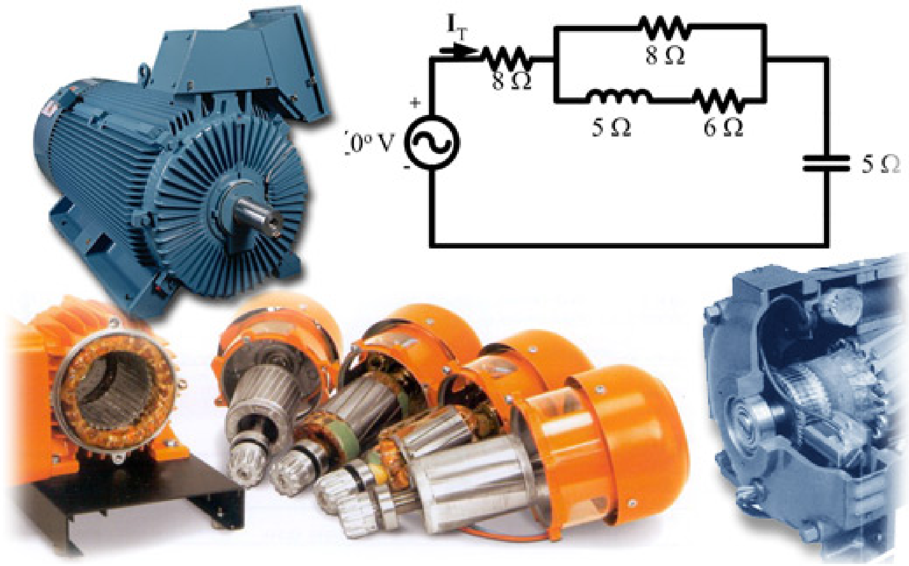
المملكـة العربيــة الســعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

قوى كهربائية - آلات و معدات كهربائية

تقنية التحكم الآلي

233 كهر



مقدمه

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي؛ لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " تقنية التحكم الآلي " لمتدربي قسم" آلات ومعدات كهربائية " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تمهيد

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على سيدنا محمد وآله وصحبه،أما بعد، فهذه حقيبة تعليمية بعنوان: "تقنية التحكم الآلي" نقدمها لأبنائنا متدربي الكليات التقنية التابعة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني، تخصص "تقنية كهربائية".

الهدف من دراسة هذا المقرر تمكين المتدرب من معرفة أساسيات التحكم الآلي ، ونظم التحكم الصناعية وخواصها كما تمكن المتدرب من تحليل منظومة التحكم ، وتحليل إشارة الخطأ التي تتولد في أنظمة التحكم في حالة استخدام أنواع الحاكمات.

وقد تم توزيع محتوى المادة العلمية على أربع وحدات تعليمية هي:

الوحدة الأولى بعنوان أساسيات التحكم الآلي ونتناول في هذه الوحدة مكونات منظومة التحكم الأساسية، ونعرض كيفية بناء المخطط الصندوقي، نظريات تحويل المخطط الصندوقي، مخطط تدفق الإشارة، وتصنيف أنظمة التحكم الآلي.

الوحدة الثانية بعنوان نظم التحكم الصناعية وخواصها ونتعرف في هذه الوحدة إلى نظريات تحويل لابلاس ولابلاس العكسي وكذلك التعرف على طرق نمذجة الأنظمة الميكانيكية الانتقالية والدورانية كما يتم التعرف على الصمامات وأنواع الحاكمات.

الوحدة الثالثة بعنوان تحليل منظومة التحكم ونتطرق في هذه الوحدة إلى كيفية الحصول على دالة التحويل للنظام وكذلك معرفة التحليل الزمني لأنظمة التحكم.

الوحدة الرابعة بعنوان منظومة التحكم ذات الدائرة المغلقة ونتناول في هذه الوحدة تحليل إشارة الخطأ في االنظام المغلق باستخدام حاكمات مختلفة.

وقد روعي عند إعداد هذه الحقيبة البساطة في تقديم المادة العلمية بحيث لا نلجأ إلى التحليل الرياضي إلا عند الضرورة ولقد زودت كل الوحدات التعليمية بأمثلة لتيسير استيعاب المتدرب للمادة العلمية العملية والمفاهيم الأساسية. كما تم وضع أسئلة وتمارين في نهاية كل وحدة تعليمية ليتمكن المتدرب من اختبار ما اكتسبه من جدارة، وتغرس فيه عادة التعلم الذاتي.

المملكــة العربيــة الســعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تقنية التحكم الآلي

أساسيات التحكم الآلي

أساسيات التحكم الآلي

1

الوحدة الأولى: أساسيات التحكم الآلي

الأهداف:

بعد انتهائك من دراسة هذه الوحدة تكون قادرا على:

- تعريف تكنولوجيا أنظمة التحكم الآلي.
- ذكر بعض مجالات تطبيق تكنولوجيا أنظمة التحكم الآلي.
- معرفة مكونات منظومة التحكم الاساسية.
- معرفة المخطط الصندوقي ومكوناته
- معرفة كيفية بناء المخطط الصندوقي
- التعرف على نظريات تحويل المخطط الصندوقي
- معرفة مخطط تدفق الاشارة وكذلك معرفة أساسياته.
- التعرف على قواعد مخطط تدفق الاشارة (قاعدة ماسون)
- معرفة تصنيف انظمة التحكم الآلي والمقارنه بينهما.
- معرفة تبسيط المخططات الصندوقية المعقدة.

1-1. مقدمة -Introduction

نظـام الـتحكم (Control-System) هـو عبـارة عـن عـدة عناصـر تعمـل معـا لتشـكل وظيفـة معينـة. أي أنـه يمكـن القـول بـأن نظـام الـتحكم عبـارة عـن مجموعـة مـن المكونـات الـتي تسـتجيب للإشـارة. اسـتجابة هـذه المكونـات تعطـى لأداء الوظيفـة المعينـة. في معظـم الحـالات تكـون هـذه الوظيفـة تحكـم في مـتغير طبيعـي مثـل (السـرعة - درجـة الحـرارة - الإزاحـة - الجهـد أو الضـغط). وتكـون الإشـارة الـتي تجعـل هـذه المكونـات تعمـل للقيـام بالوظـائف المطلوبـة منهـا تسـمى إشارة التشغيل.

إن للـتحكم الآلـي دورا أساسـيا في تقـدم الهندسـة والعلـوم الحديثـة. وبالإضـافة إلى أهميتـة القصـوى في سـفن الفضـاء وتوجيـه الصـواريخ والطـيران، فـإن تطبيقـات الـتحكم الآلـي أصـبحت جزءا هاما ومكملاً لمختلف الصناعات الهندسية، مثل:

محطات توليد الطاقة الكهربائيه وتحلية المياه،

مصافي تكرير النفط،

مصانع تعبئة قارورات الغاز،

مصانع تعبئة المواد الغذائية،

صناعة السيارات،

مصانع الإسمنت،

الملاحة الجوية والبحرية

التطبيقات العسكريات...

كمـا أن لـنظم الـتحكم دور كـبير في أنظمـة القـوى الكهربيـة والـتي تعتـبر مـن أكـبر الأنظمـة الصـناعية الـتي صـنعها الإنسـان، فـالتحكم في الشـبكات والآلات والأحمـال يعتـبر عـاملاً أساسـياً لضـمان تشـغيل هـذه الأنظمـة التشـغيل الاقتصـادي والأمثـل. ومـن الأمثلـة لتطبيقـات نظـم التحكم في مجال الكهرباء :

التبريد والتكييف،

التدفئة الأفران،

الغسالات والنشافات....

ولقـد أصـبحت مفـاهيم الـتحكم الآلـي الـتي كانـت حكـرا علـى التقنـيين والمهندسـين، تسـتخدم في شـتى مجـالات المعرفـة مثـل علـوم الأحيـاء والاقتصـاد والاجتمـاع والتربيـة فضـلا عـن أنظمـة النقـل

(Transportation Systems) والتخطيط العمراني (Urban Planning) والبيئة (Environment). ومن الجدير بالذكر أن التطور الكبير الذي نشهده حاليا في تكنولوجيا الحاسبات الإلكترونية (Computers) والإنسان الآلي (Robot) له أثر كبير على تزايد تطبيقات أنظمة التحكم المتقدمة في كثير من المجالات.

2-1. مكونات منظومة التحكم الأساسية (Common Control System's Components):

الدخل (Input): **هو المتغير الذي يعطى إلى النظام بقصد التحكم فيه أو تغيير حالته.**

الخرج(Output): **هو الكمية أو المتغير المراد التحكم فيه والذي يتأثر بتغير الدخل.**

الخطأ(Error): **هو عبارة عن كمية الفرق بين إشارة الدخل (Input) وإشارة الخرج (Output).** **ويسمى كذلك بعنصر المقارنة لأنة يقوم بمقارنة الإشارتين السابقتين.**

المرجع (Reference): **هي إشارة خارجية تطبق على نظام التحكم وذلك لغرض اختبار النظام المتحكم فية ووصولة الى هذه الاشارة.**

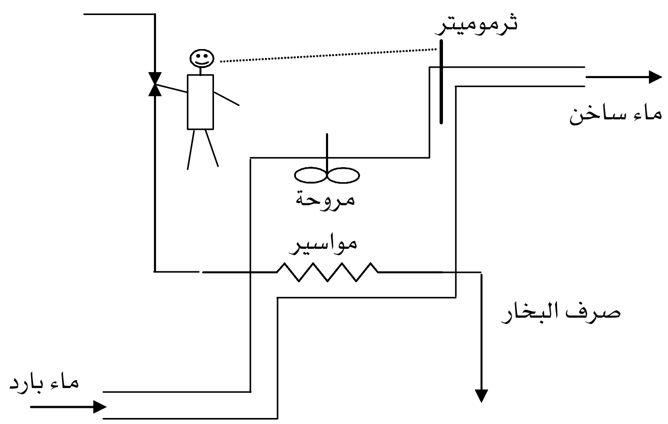
3-1. أمثلة توضيحية لأنظمة التحكم Illustrative Examples of Control Systems

فيما يلي نعطي وصفا مبسطا لبعض أنظمة التحكم بهدف توضيح فكرة التحكم ذو التغذية الخلفية:

مثال (1 - 1) التحكم اليدوي لنظام حراري:

شكل (1 -1) يبين نظام تحكم يدوي ذو تغذية خلفية للتحكم في درجة حرارة نظام حراري عبارة عن عملية تسخين مياه عن طريقة إمرارها في وعاء يحتوي على مواسير يمر بها بخار ماء ساخن بدرجة حرارة عالية حيث يتم في هذا الوعاء عملية تبادل حراري بين البخار الساخن والمياه الباردة فترتفع درجة حرارة المياه. وتستخدم المروحة المبينة في الشكل لتقليب المياه داخل الوعاء لرفع كفاءة التبادل الحراري وضمان توزيع درجة الحرارة بانتظام خلال المياه .

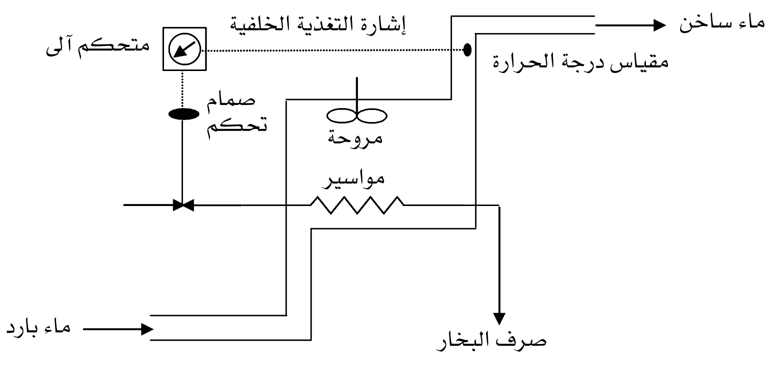
ويتم قياس درجة حرارة المياه عن طريق الترمومتر ويقوم الإنسان بمراقبة درجة الحرارة ومقارنتها بدرجة الحرارة المطلوبة. فإذا وجد أن درجة الحرارة المقاسة (خرج نظام التحكم) أقل من المطلوب يقوم بزيادة فتحة صمام البخار ليسمح بمرور كمية أكبر من البخار الساخن



شكل(1-1) نظام تحكم حراري يدوي

وبذلك ترتفع درجة حرارة المياه . وإذا لوحظ أن درجة حرارة المياه أكثر من اللازم يقوم بتقليل فتحة صمام البخار. وبذلك يتم التحكم هنا عن طريق الإنسان ولهذا يسمى تحكم يدوي.

مثال (1 -2) التحكم الآلي للنظام الحراري:



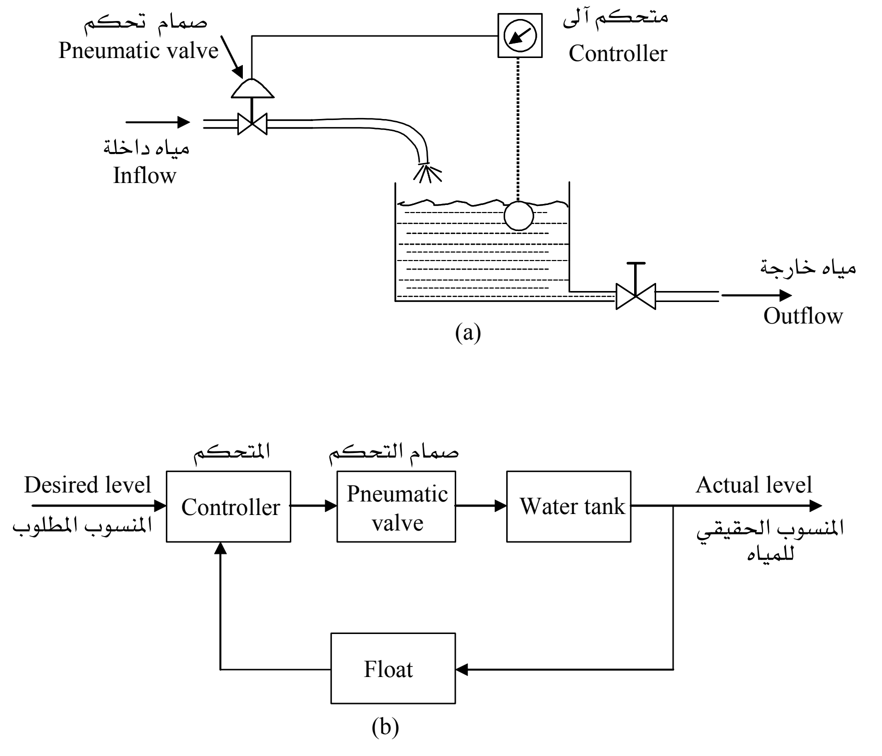
شكل(1-2) نظام تحكم حراري يدوي

حيث تم هنا استخدام آلات للقيام بعملية التحكم بدلا من الإنسان كما هو موضح في الشكل رقم (1 -2). والمطلوب من الآلات هنا تحديد درجة حرارة المياه. ومقارنتها بدرجة الحرارة المطلوبة وإذا وجد أي خلاف يقوم المتحكم الآلي بتحريك صمام البخار لإعادة ضبط درجة الحرارة إلى القيمة المطلوبة.

ويلاحظ أن مقياس الحرارة هنا يختلف عن الترمومتر العادي الذي يبين درجة الحرارة ويمكن معرفتها بالنظر. ففي التحكم الآلي تقاس درجة الحرارة وتحول إلى إشارة يمكن مقارنتها بالدخل المقارن (وهو درجة الحرارة المطلوبة). ويمكن أن يتم ذلك عن طريق تحويل درجات الحرارة المقاسة والمطلوبة إلى فروق جهد يمكن مقارنتها مباشرة والفرق بينهما يمكن استخدامه بواسطة المتحكم للتحكم في فتحة صمام البخار عن طريق محرك كهربائي مثلا.

مثال(1 -3) نظام تحكم في مستوى المياه في خزان :

كما هو مبين بالشكل (1 - 3أ) يتم قياس منسوب المياه (خرج النظام) عن طريق عوامة ويقوم المتحكم بمقارنه المنسوب الحقيقي للمياه بالمنسوب المطلوب (الدخل المقارن) وفى حالة وجود أي خزان يتم فتح صمام التحكم في دخول المياه. وإذا كان لدينا ارتفاع معين للماء في الخزان وأن كمية المياه الخارجة للمستهلكين مساوية لكمية المياه الداخلة فإن النظام يكون مستقر في هذه الحالة. وإذا حدث تغيير في كمية المياه الخارجة مثلا (اضطراب خارجي) يتغير ارتفاع منسوب المياه في الخزان وعليه يتغير وضع العوامة وبذلك يعمل المتحكم على تغيير فتحة صمام التحكم في المياه الداخلة لإعادة ضبط ارتفاع المياه في الخزان.

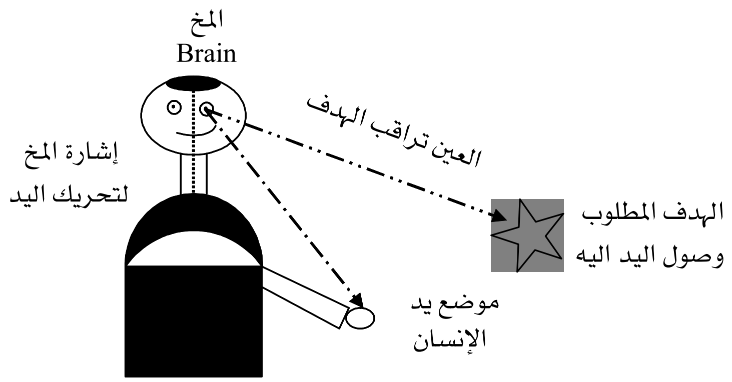


شكل(1-3) نظام تحكم في مستوى المياه في خزان

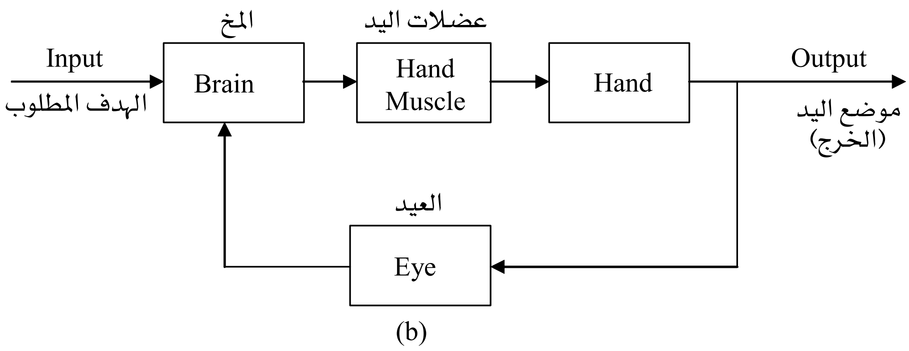
الشكل (1 -3ب) يبين رسما تخطيطيا لنظام التحكم في منسوب المياه المبين في الشكل (ا -3أ) وهذا النظام ذو التغذية الخلفية يمثل كل جزء منه بصندوق وبين خطوط التوصيل والأسهم مسارات إشارات التحكم والدخل والخرج والتغذية الخلفية .

مثال (1 -4) نظام تحكم بيولوجي (تحكم طبيعي في جسم الإنسان):

يبين هذا النظام في الشكل (1 -4أ) والمطلوب فيه هو وصول اليد إلى التقاط شيء معين (هدف) يتم تحديد مكان الهدف في المخ ويقوم المخ بإرسال إشارات تحكم إلى اليد والعضلات حيث تقوم العضلات بتكبير إشارات التحكم وتتحرك اليد للوصول للهدف حيث تراقب العين حركة اليد وتغذي هذه المعلومة إلى المخ الذي يتم فيه مقارنة الخرج (وهو موضع اليد) بالدخل (وهو الهدف المطلوب الوصول إليه) وفى حالة وجود فرق بين الدخل والخرج يرسل المخ إشارات تحكم لليد عن طرق العضلات وتستمر هذه الحركة حتى يتم الوصول إلى الهدف. ويبين الشكل (ا - 4ب) رسم تخطيطي لهذا النظام.



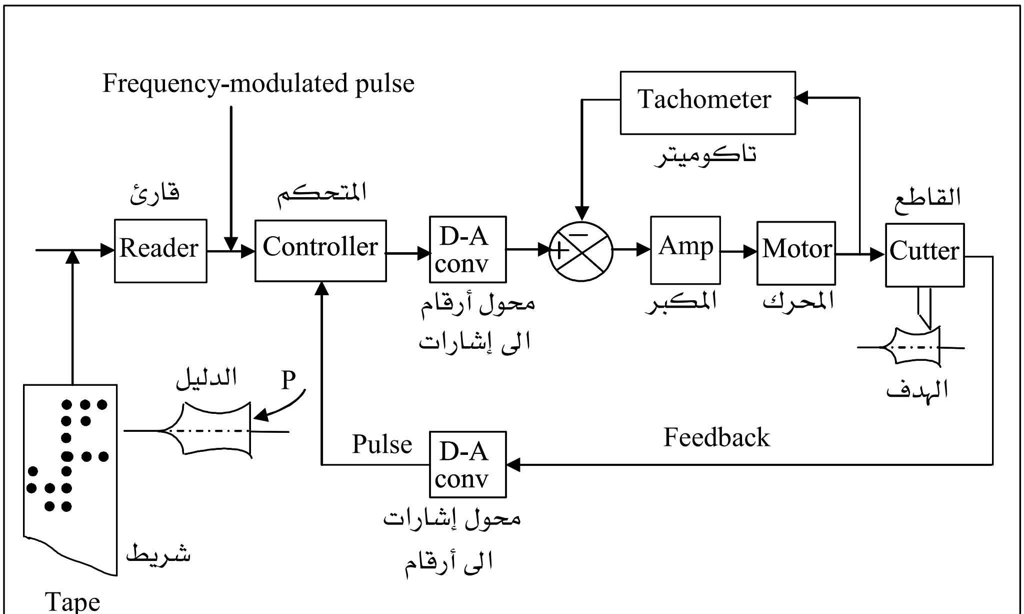
شكل(1-8أ) نظام تحكم طبيعي في جسم الإنسان



شكل(1-4) رسم تخطيطي لنظام تحكم طبيعي في جسم الإنسان

مثال (1 -5) نظام تحكم في الة قطع وتشكيل معادن :

يبين الشكل (1 -5) التحكم العددي (Numerical Control) في آلة قطع وتشكيل معادن وهو طريقة للتحكم في حركة أجزاء الماكينات باستخدام الأعداد (Numbers). ويتم التحكم في حركة رأس القطع عن طريق بيانات (إعداد ثانية) محفوظة على شريط. وبعد إعداد الشريط ليمثل الشكل المطلوب لمعدن يغذي هذا الشريط إلى القارئ (Reader). يقوم نظام التحكم بمقارنة هذا الدخل المطلوب بإشارة التغذية الخلفية الممثلة للموضع الحقيقي لرأس القطع. ويقوم المتحكم بإجراء حسابات خاصة على الفرق بين الخرج والدخل (والمقصود بالخرج هنا هو موضع رأس القطع) ثم يرسل المتحكم إشاراته بعد تكبيرها إلى المحرك الذي يقوم بدوره بتحريك رأس القطع.



شكل(1-5) نظام تحكم عددي في آلة قطع وتشكيل معادن

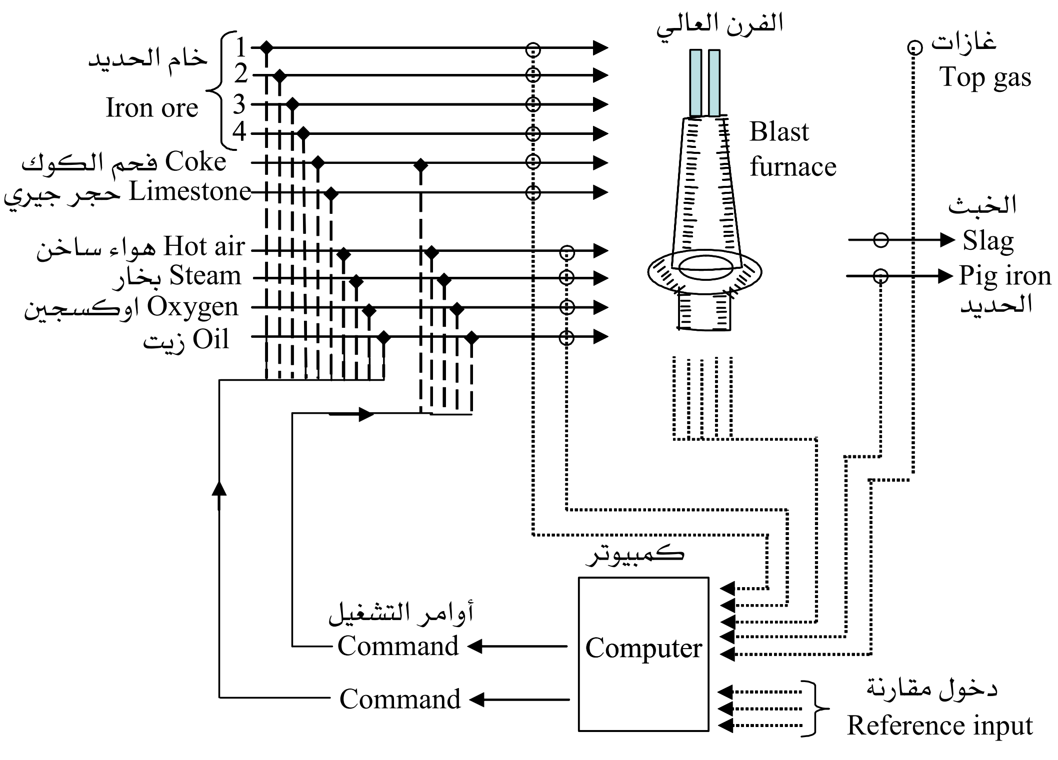
ونظرا لأن المتحكم هنا عددي فإن إشارات التغذية الخلفية تحول أولا إلى أعداد قبل تغذيتها إلى المتحكم وذلك عن طرق (Analog to Digital Converter) وخرج المتحكم العددي يحول كذلك إلى إشارات عن طريق جهاز (Digital to Analog Converter) ويلا حظ في هذا الرسم وجود خط تغذية خلفية داخلي لمتحكم في سرعة دوران المحرك. ويتميز هذا النوع من التحكم العددي بأن الأجزاء المعقدة يمكن إنتاجها وتشكيلها بمواصفات دقة موحدة وبأعلى سرعة لماكينات القطع.

مثال(1 -6) نظام التحكم في إشارات المرور:

التحكم في مرور السيارات بالشوارع عن طريق إشارات المرور التي تعمل على أساس توقيت زمن محدد يعتبر نظام تحكم ذو دائرة مفتوحة. أما إذا تم تحديد عدد السيارات التي تنتظر عند الإشارات و تغذية هذه المعلومات إلى كمبيوتر تحكم مركزي فإنه يمكن تنظيم حركة المرور بطريقة أفضل وذلك بتغيير زمن فتح و إغلاق الإشارات عن طريق إشارات تحكم تأتي من مركز التحكم.

مثال (1 -7) نظام تحكم بالكمبيوتر الفرن العالي :

يبن الشكل(1 -6)رسما تخطيطيا لنظام تحكم بالكمبيوتر الفرن العالي. ويعتبر الفرن العالي(blast furnace) منشأ ضخم يصل ارتفاعه إلى 35متراً ويصل إنتاج الأفران الحديثة من الحديد لأكثر من 4000 طن في اليوم ونظرا لطبيعة هذه الصناعة فإن تشغيل الفرن يكون مستمرا لأوقات طويلة (عدة سنوات).



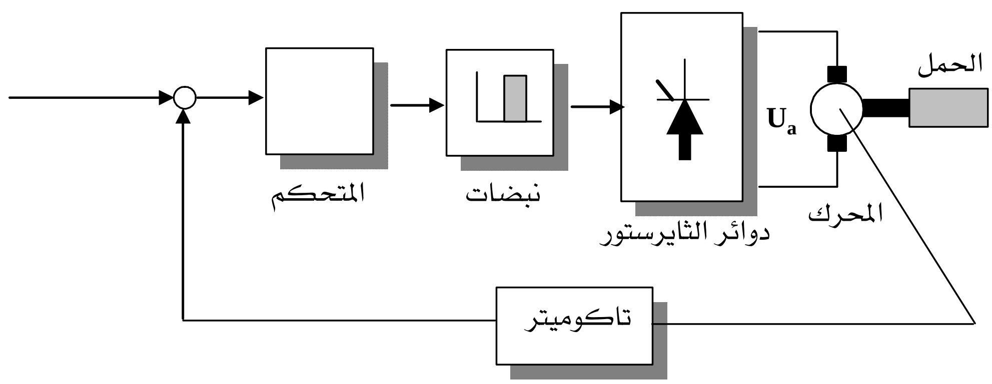
شكل(1-6) نظام تحكم بالكمبيوتر الفرن العالي

تعتمد نظرية عمل هذا النظام على تعبئة المكونات الأساسية (الحديد الخام والحجر الجيري وفحم الكوك) من أعلى الفرن بكميات ونسب محددة. كذلك يسخن الهواء ويدفع إلى الفرن وتنتج الحرارة في الفرن بحرق فحم الكوك حيث ينتج عنه غاز أول أكسيد الكربون. ولكن هذا الغاز وكذلك فحم

الكوك يعملان على تقليل عملية انصهار الحديد الخام بينما يعمل الحجر الجيري كمساعد للصهر ويقوم بإزالة الخبث والشوائب ويتجمع الحديد المنصهر في قاع الفرن بينما يتجمع الخبث السائل على السطح. ويتم تصريف الحديد المنصهر والخبث السائل بصفة دورية من فتحات خاصة ونظرا لأن تواجد الكربون والمنجنيز والسليكون والكبريت والفسفور وخلافه يعتمد على نسب ومكونات الحديد الخام والفحم والجير المستخدم، فإنه من الصعب جدا على الإنسان أن يقوم بالتحكم في هذه العملية الصناعية الكيميائية المعقدة. لذلك فإنه في مثل هذه الحالات يستخدم الكمبيوتر للتحكم حيث يتم تجميع البيانات والمعلومات عن تركيبة الحديد الناتج والخبث والغازات الأخرى ودرجة الحرارة والضغط داخل الفرن. بالإضافة إلى مكونات ونسب الحديد الخام وفحم الكوك والحجر الجيري. وتغذى هذه البيانات والمعلومات إلى الكمبيوتر عند فترة زمنية محددة . ويقوم الكمبيوتر من خلال برامج التحكم المختزنة فيه بتحديد النسب المثلى لمكونات أو كميات المواد الخام التي تدخل إلى الفرن لإنتاج نوعية معينة من الحديد. وبالتالي يمكن التشغيل المستقر للفرن بحالة مرضية.

مثال (1 -8) نظام تحكم الكتروني في سرعة محرك تيار مستمر :

يبين الشكل (1 - 7) رسما مبسطا لنظام تحكم إلكتروني في سرعة محرك تيار مستمر يدير حمل ميكانيكي. ويقوم المتحكم بإنتاج نبضات Pulses بتوقيتات معينة لإشعال دوائر الثايرستور التي تقوم بدورها بإنتاج جهد موحد U_a محكوم - هذا الجهد ناتج من توحيد التيار المتردد ثلاثي الطور عن طريق دوائر الثايرستور. ويتم قياس سرعة المحرك بواسطة مولد صغير (التاكوميتر) يولد جهد يتناسب مع السرعة ويتم مقارنة هذا الجهد بالدخل المقارن وهو عبارة عن جهد أيضا يتناسب مع السرعة المطلوبة، والفرق بين الجهدين يغذى المتحكم.



شكل(1-7) نظام تحكم إلكتروني في سرعة محرك تيار مستمر

4-1. المخطط الصندوقي (Block Diagram) ومخطط السريان (Flow Graph) :

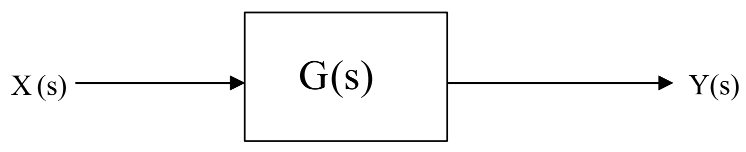
المخطط الصندوقي: **تتكون أنظمة التحكم من عدة مكونات مرتبطة ببعضها ولتوضيح وظيفة كل من هذه المكونات وسريان الإشارات المختلفة بالإضافة إلى العلاقة بين المكونات وبعضها، فإن رسم معين يستخدم لذلك. هذا الرسم يسمى المخطط الصندوقي.**

وعند رسم المخطط الصندوقي يتم استخدام صناديق كل صندوق يرمز لعملية رياضية تجري.

1-4-1. المخطط الصندوقي Block Diagram

تتكون أنظمة التحكم من عدة مكونات elements مرتبطة ببعضها وتوضيح وظيفة كل من هذه المكونات وسريان الإشارات المختلة بالإضافة إلى العلاقة بين المكونات بعضها فإن رسم معين يستخدم لذلك . هذا الرسم يسمى المخطط الصندوقي Block diagram.

وعند رسم المخطط الصندوقي يتم استخدام صناديق blocks كل صندوق يرمز لعملية رياضية تجرى على إشارة الدخل input signal لإنتاج إشارة الخرج output signal وعادة تكتب دالة التحويل transfer function داخل كل صندوق وترسم أسهم لبيان سريان الإشارات المختلفة . هذا مع الأخذ في الاعتبار أن اتجاه سريان الإشارات يكون فقط في اتجاه الأسهم وليس العكس. والشكل (1 -8) يبين عنصر من عناصر المخطط الصندوقي مع ملاحظة أن السهم المتجه إلى الصندوق يبين إشارة الدخل أما السهم الخارج من الصندوق فإنه يبين إشارة الخرج لهذا العنصر.



شكل (1-8) عنصر من المخطط الصندوقي

حيث أن:

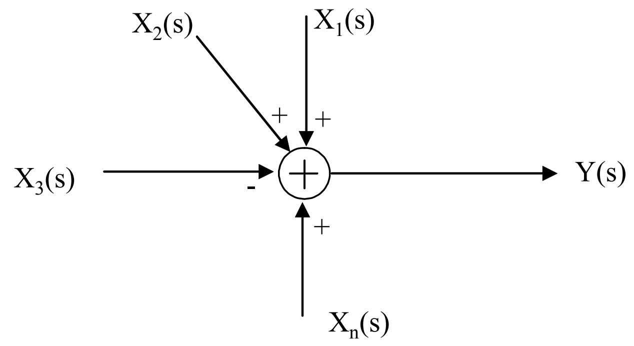
$$Y(s) = G(s)X(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

وتتميز طريقة استخدام المخطط الصندوقي لتمثيل أنظمة التحكم بأنه يمكن الحصول على الرسم التخطيطي الكامل لنظام التحكم بتوصيل الصناديق الممثلة للمكونات حسب سريان إشارات التحكم . وكذلك فإنه يمكن تحديد ومعرفة تأثير كل جزء على خصائص نظام التحكم الكلي. وبصفة عامة فإنه قد يكون من الأسهل متابعة طريقة عمل نظام التحكم بفحص المخطط الصندوقي للنظام بدلا من فحص النظام الحقيقي نفسه . ويحتوي الرسم التخطيطي للمخطط الصندوقي على سلوك الديناميكي للأنظمة وليس على تركيبها الطبيعي. ويجب ملاحظة أن المنبع الرئيسي للطاقة لا يظهر بطريقة واضحة في المخطط الصندوقي لنظام التحكم وكذلك فإن الرسم التخطيطي للمخطط الصندوقي لنظام معين يمكن أن يختلف حسب طريقة تحليل النظام.

أ - عنصر التجميع Summing Element

عنصر التجميع أو نقطة التجميع هو عنصر الإشارة الخارجة من هي عبارة عن المجموع الجبري للإشارات الداخلة له كل حسب نوع إشارته (موجبة أو سالبة) كما هو مبين في الشكل (1 -9).



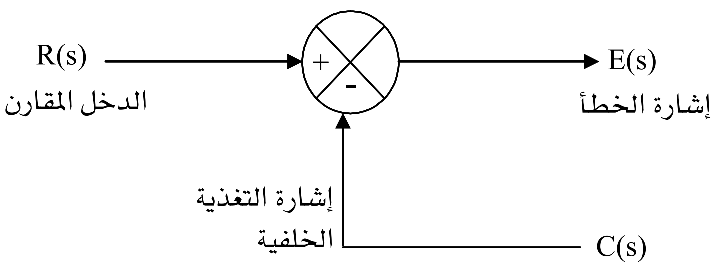
شكل (1-9) عنصر التجميع

أي أن:

$$Y(s) = X_1(s) + X_2(s) - X_3(s) + ... + X_n(s)$$

ب - مبين الخطأ Error Detector

مبين أو كاشف الخطأ ينتج إشارة هي عبارة عن الفرق بين إشارة الدخل 7 وإشارة التغذية الخلفية feedback signal. ويسمى مبين الخطأ أيضا بعنصر المقارنة comparing element لأنه يقوم بمقارنة نفس الإشارتين السابقتين ويكون خرج عنصر المقارنة هو الفرق بين الإشارتين المذكورتين كما هو موضح بالشكل (1 -10).



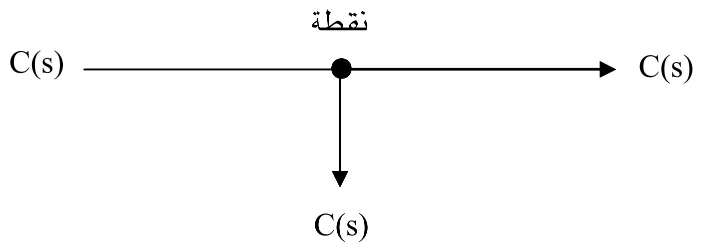
شكل (1-10) الرسم التخطيطي لمبين الخطأ

وبذلك تكون إشارة الخطأ هي:

$$E(s) = R(s) - C(s) \qquad (3-3)$$

ج - نقطة التفريع Branch point

نقطة التفريع هي نقطة يتم عندها تفر يع الإشارة C(s) إلى فرعين بحيث أن الفرع الإضافي يكون من نفس نوع الإشارة وله نفس الكميات والوحدات كما هو مبين بالشكل (1 -11). ويمكن خروج أكثر من فرع للإشارة من نفس نقطة التفريع.



شكل (1-11) الرسم التخطيطي نقطة تفريع

- **كيفية بناء المخطط الصندوقي في أنظمة التحكم Construction of Block Diagram**

تتكون أنظمة التحكم من مجموعة مكونات أو أجزاء مرتبطة ببعضها للقيام بوظيفة معينة. وهناك عدة خطوات يجب أن تتبع لرسم المخطط الصندوقي كالتالي:

أ - يتم كتابة المعادلات التفاضلية أو الجبرية التي تصف أجزاء النظام كل جزء على حده.

ب - يتم إجراء التحويل اللابلاسي لهذه المعادلات مع الأخذ في الاعتبار أن جميع القيم الابتدائية تكون صفر.

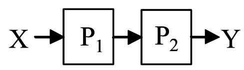
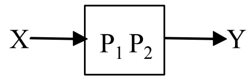
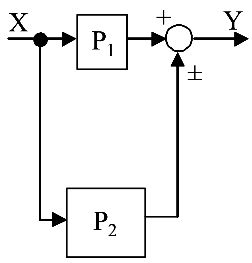
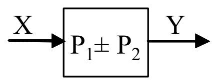
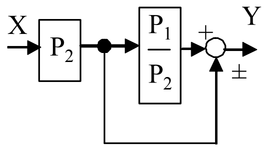
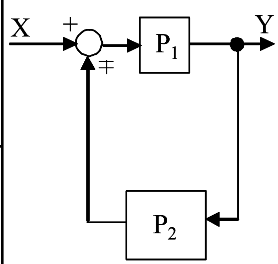
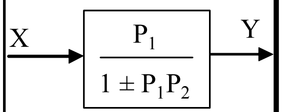
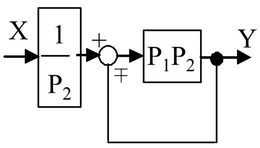
ج - يتم إيجاد دالة التحويل التي تصف كل جزء من أجزاء النظام .

د - يتم رسم صندوق ليمثل كل جزء مع كتابة دالة التحويل الخاصة به بداخله مع بيان إشارات الدخل والخرج لكل صندوق .

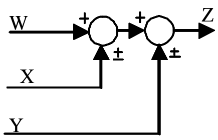
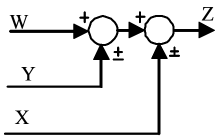
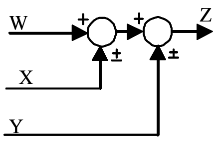
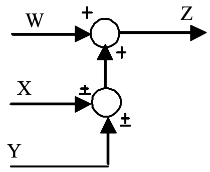
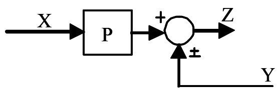
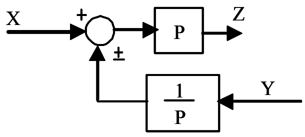
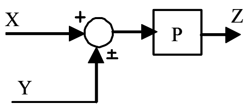
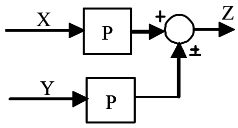
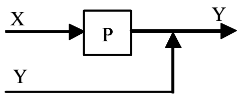
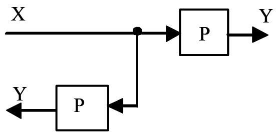
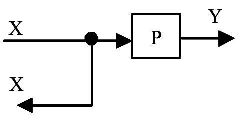
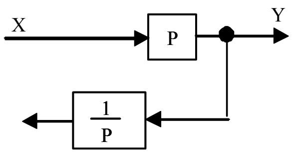
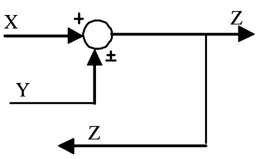
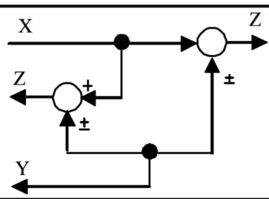
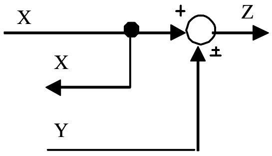
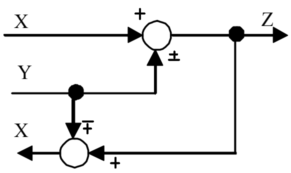
ه - يتم تجميع هذه الصناديق عن طريق توصيلها مع بعضها بأسهم لبيان إشارات الدخل والخرج لجميع الأجزاء للحصول على الرسم التخطيطي النهائي للنظام .

- **نظريات تحويل المخطط الصندوقي Block Diagram Transformation Theorems**

في المخططات الصندوقية لأنظمة التحكم الكبيرة نحتاج إلى بعض التحويلات التي تخضع لقواعد معينة. هذه القواعد مبينة بالتفصيل في الجدول (3 - 1) حيث يبين الرسم التخطيطي الأصلي والمكافئ له في كل حالة . ويلاحظ أن الحرف P أستخدم لتمثيل الدالة الانتقالية و الأحرف H,X,Y,Z ترمز إلى أي إشارات دالة في المتغير S.

<table>
<tr><th colspan="2">Transformation</th><th>Equation</th><th>Block Diagram</th><th>Equivalent Block Diagram</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Combining Blocks in Cascade</td><td>$Y = (P_1P_2)X$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>Combining Blocks In parallel; or Eliminating a Forward Loop</td><td>$Y = P_1X \pm P_2X$</td><td rowspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>Removing a block From a Forward Path</td><td>$Y = P_1X \pm P_2X$</td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td>Eliminating a Feedback loop</td><td>$Y = P_1(X \mp P_2Y)$</td><td rowspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td>Removing a Block From a Feedback Loop</td><td>$Y = P_1(X \mp P_2Y)$</td><td></td></tr>
</table>

جدول (1-3) نظريات تحويل المخطط الصندوقي

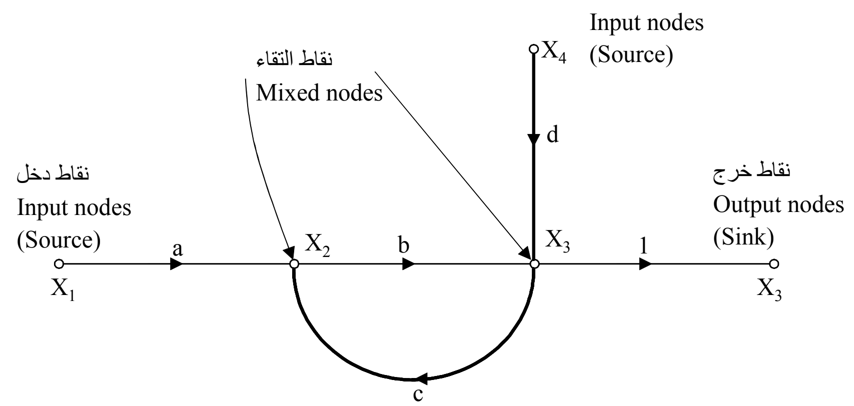
Transformation		Equation	Block Diagram	Equivalent Block Diagram
6a	Rearranging Summing Points	Z = W ± X ± Y		
6b	Rearranging Summing Points	Z = W ± X ± Y		
7	Moving a Summing Point Ahead of a Block	Z = PX ± Y		
8	Moving a Summing Point Beyond of a Block	Z = P(X ± Y)		
9	Moving a Takeoff Point Ahead of a Block	Y = PX		
10	Moving a Takeoff Point Beyond a Block	Y = PX		
11	Moving a Takeoff Point Ahead of a Summing point	Z = X ± Y		
12	Moving a Takeoff Point Beyond a Summing point	Z = X ± Y		

- **مخطط تدفق الإشارة Signal Flow Graph**

كما سبق فإن المخطط الصندوقي يكون مفيدا في التمثيل بالرسم لأنظمة التحكم. وفي بعض أنظمة التحكم المعقدة جدا حيث تكون طريقة اختصار أو تبسيط المخطط الصندوقي تأخذ من الوقت كثيرا هناك طريقة أخرى لإيجاد العلاقة بين الدخل والخرج ومتغيرات النظام المعقد تسمى مخطط تدفق الإشارة.

أ - أساسيات مخطط تدفق الإشارة Fundamental of Signal Flow Graph

يعرف مخطط تدفق الإشارة بأنه الرسم التخطيطي الذي يمثل مجموعة من المعادلات الجبرية الخطية والتي يجب عند تطبيق هذه الطريقة على أنظمة التحكم أولا تحويل المعادلات التفاضلية الخطية إلى معادلات جبرية . ويتكون مخطط التدفق من عدة نقاط التقاء متصلة بواسطة عدة أفرع وكل نقطة اتصال تمثل متغير من متغيرات النظام وكل فرع متصل بين نقطتي التقاء يعتبر كإشارة بالإضافة إلى نقطة دخل وأخرى الخرج. كما هو مبين بالشكل(1 -12).



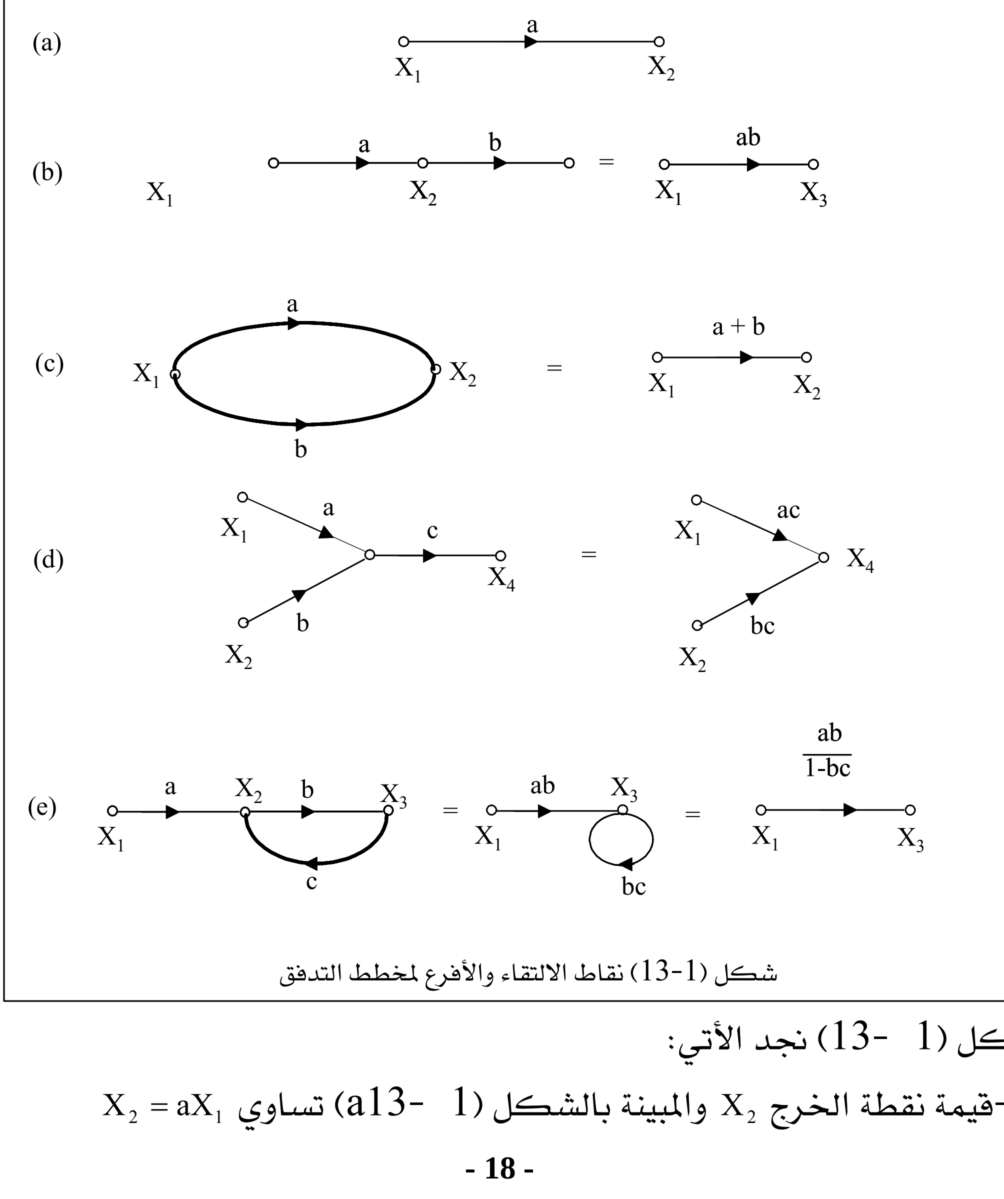
شكل (1-12) نقاط الالتقاء والأفرع لمخطط التدفق

ويلاحظ أن مخطط التدفق لابد أن يكون في اتجاه واحد ويحدد اتجاه سريان الإشارة بأسهم توضع على الأفرع في منتصفها وليس في أولها. أما معامل ضرب الإشارة فيبين على الفرع نفسه. وعلى ذلك فإن مخطط تدفق الإشارة يوضح عن طريق الرسم سريان أو تدفق الإشارات من نقطة معينة في النظام إلى نقطة أخرى لكي يعطى العلاقات المختلفة بين الإشارات. ويمكن القول بأن مخطط التدفق للإشارات يحتوى على نفس المعلومات التي يحتوى عليها المخطط الصندوقي ولكن الميزة في استخدام مخطط

التدفق لتمثيل أنظمة التحكم هو أن هناك صيغة كسب تسمى قاعدة ماسون Masons rule التي يمكن تطبيقها للحصول على العلاقة بين متغيرات النظام والخرج والدخل دون الحاجة إلى تبسيط أو اختصار المخطط.

ب - قواعد مخطط تدفق الإشارة Basics of Signal Flow Graph

لإيجاد العلاقة بين الدخل والخرج لنظام تحكم عن طريق مخطط التدفق فإن قاعدة ماسون من أسهل الطرق التي تستخدم لذلك. أو استخدام عملية الاختصار لمخطط التدفق الكبير إلى مخطط تدفق آخر يحتوي فقط على نقطة التقاء واحدة للدخل وأخرى للخرج. وفيما يلي سوف نعرض القواعد المستخدمة لذلك كما هو مبين بالشكل (1 -13).



شكل (1-13) نقاط الالتقاء والأفرع لمخطط التدفق

وبدراسة الشكل (1 -13) نجد الأتي:

1 -قيمة نقطة الخرج X_2 والمبينة بالشكل (1 -13a) تساوي $X_2 = aX_1$

2 -مجموع الإشارات الخاصة بالأفرع المتصلة على التوالي تساوي حاصل ضربهم كما تشكل(1 -13b).

3 -مجموع الإشارات الخاصة بالأفرع المتصلة على التوازي تساوي مجموعهم كما في الشكل(1 -13c)

4 -نقطة الالتقاء يمكن أن تحذف كما في الشكل (1 -13d)

5 -نقطة الالتقاء يمكن أن تحذف كما في الشكل (1 -13e)مع ملاحظة أن :

$$x_3 = bx_2,\ \ x_2 = ax_1 + cx_3$$

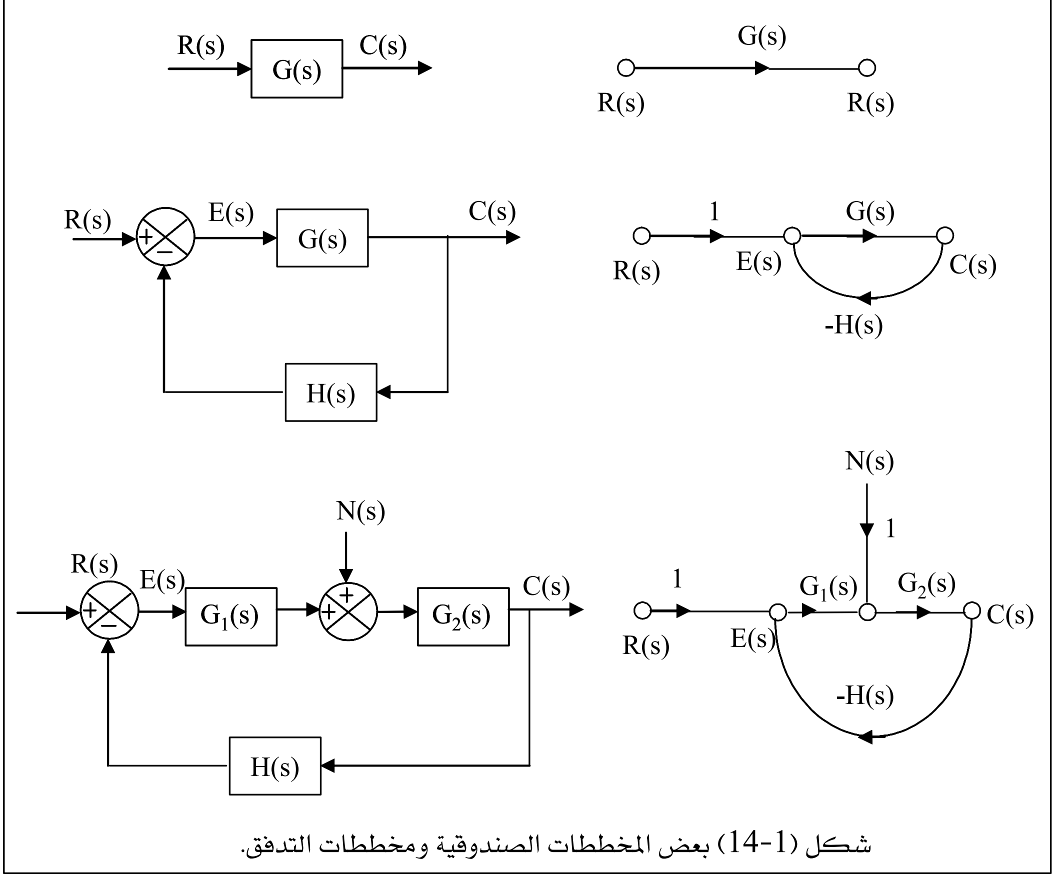
أي أن :

$$x_3 = abx_1 + bcx_3$$

أو :

$$x_3 = [ab/(1 - bc]x_1$$

و الشكل (1 - 14) يوضح بعض المخططات الصندوقية ومخططات التدفق التي تكافؤها.



شكل (1-14) بعض المخططات الصندوقية ومخططات التدفق.

- **قاعدة ماسون لمخططات التدفق Mason's Rule For Signal Flow Graphs**

في معظم الأحيان التي يكون مطلوب فيها حساب العلاقة بين خرج النظام ودخله (دالة التحويل) وعندما يكون مخطط التدفق معقد يكون استخدام قاعدة ماسون مفيدا في توفير الوقت. وتعرف قاعدة ماسون بالمعادلة التالية :

$$P = \frac{1}{\Delta}\sum_{k} P_k \, \Delta_k \qquad (3\text{-}15)$$

المسار الأمامي P_k = path gain of kth forward path

يتم حسابها من المخطط Δ = determinant of graph

(مجموع حاصل ضرب كل مسارين غير متماسين)+(مجموع جميع المسارات) -1=

.......+ (مجموع حاصل ضرب كل ثلاثة مسارات غير متماسة) -

$$1-\sum_{a} L_a + \sum_{b,c} L_b L_c - \sum_{d,e,f} L_d L_e L_f + \dots\dots\dots$$

حيث إن:

$\sum_{a} L_a$ = مجموع جميع المسارات المختلفة

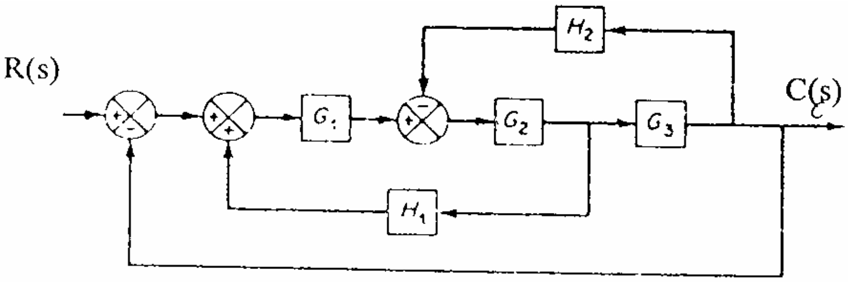
$\sum_{b,c} L_b L_c$ = مجموع حاصل ضرب كل مسارين غير متماسين

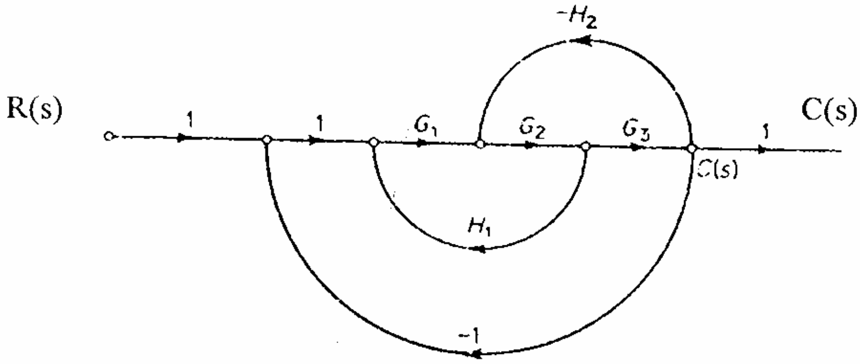
$\sum_{d,e,f} L_d L_e L_f$ = مجموع حاصل ضرب كل ثلاثة مسارات غير متماسين

Δ_k k = قيمة Δ لكل المسارات ماعدا آلتي تمس المسار

مثال (1 -9):

الشكل التالي يبين المخطط الصندوقي لنظام تحكم مخطط التدفق المكافئ له. باستخدام قاعدة ماسون أوجد دالة التحويل الكلية $\frac{C(s)}{R(s)}$.





في هذا المثال يوجد مسار واحد أمامي هي:

$$P_1 = G_1G_2G_3$$

وكذلك يوجد ثلاث مسارات مغلقة هم:

$$L_1 = G_1G_2H_1$$
$$L_2 = -G_2G_3H_2$$
$$L_3 = -G_1G_2G_3$$

ويلاحظ أن جميع المسارات المغلقة تمس بعضها البعض فتكون Δ كالتالي:

$$\Delta = 1-(L_1 + L_2 + L_3)$$
$$= 1 - G_1G_2H_1 + G_2G_3H_2 + G_1G_2G_3$$

ويلاحظ أن جميع المسارات المغلقة تمس المسار الأمامي P_1 فتحسب Δ_1 بحذف جميع المسارات المغلقة من معادلة Δ كالتالي:

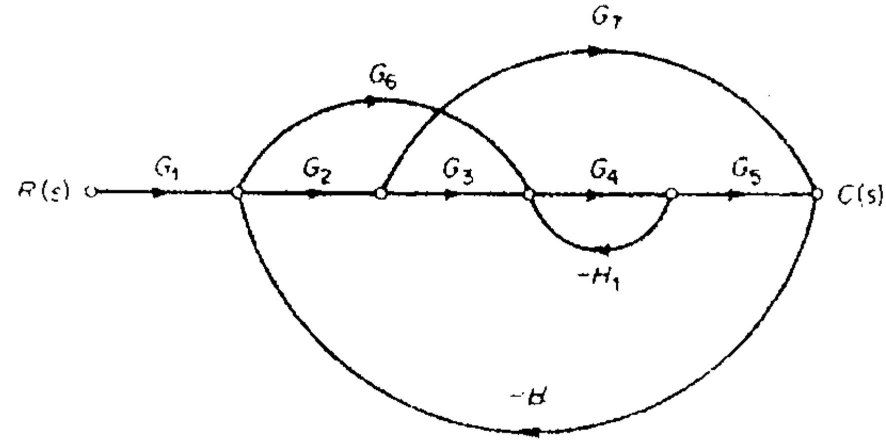
$$\Delta_1 = 1$$

وبذلك تكون دالة التحويل الكلية والتي تمثل العلاقة بين الدخل والخرج $\frac{C(s)}{R(s)}$ كالتالي:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = P = \frac{P_1\Delta_1}{\Delta}$$
$$= \frac{G_1G_2G_3}{1 - G_1G_2H_1 + G_2G_3H_2 + G_1G_2G_3}$$

مثال (1 -10):

أوجد دالة التحويل الكلية لنظام التحكم التالي باستخدام قاعدة ماسون .



الحل:

في هذا المثال يوجد ثلاث مسارات أمامية هي:

$$P_1 = G_1G_2G_3G_4G_5$$
$$P_2 = G_1G_6G_4G_5$$
$$P_3 = G_1G_2G_7$$

وكذلك يوجد أربع مسارات مغلقة هي:

$$L_1 = -G_4H_1$$
$$L_2 = -G_2G_7H_2$$
$$L_3 = -G_6G_4G_5H_2$$
$$L_4 = -G_2G_3G_4G_5H_2$$

ويوجد المسار المغلق L_1 والمسار المغلق L_2 متماسين فتحسب Δ كالتالي:

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) + L_1 L_2$$

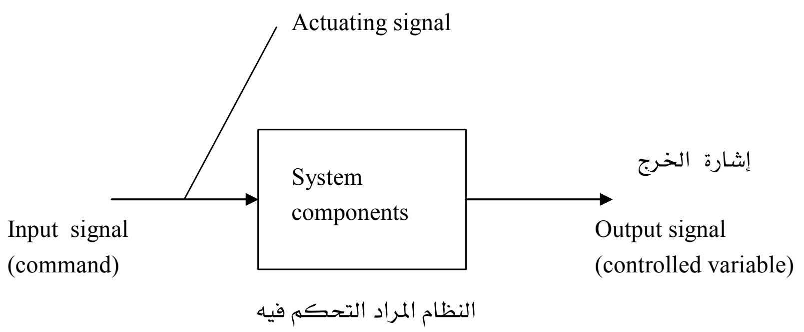
وكذلك Δ_1 تحسب بحذف المسارات المغلقة التي تمس المسار الأمامي P_1 كالتالي:

5-1. تصنيف أنظمة التحكم الآلي Classification of Control Systems

تنقسم أنظمة التحكم إلى نوعين أساسيين من التحكم، التحكم ذو الدائرة المفتوحة open loop والتحكم ذو الدائرة المقفلة closed loop control system.

1-5-1. أنظمة التحكم ذو الدائرة المفتوحة Open Loop Control Systems

في أنظمة التحكم ذات الدائرة المفتوحة لا يؤثر الخرج على عملية التحكم، أي لا يوجد بها تغذية خلفية ولا عنصر مقارنة بين الدخل والخرج.

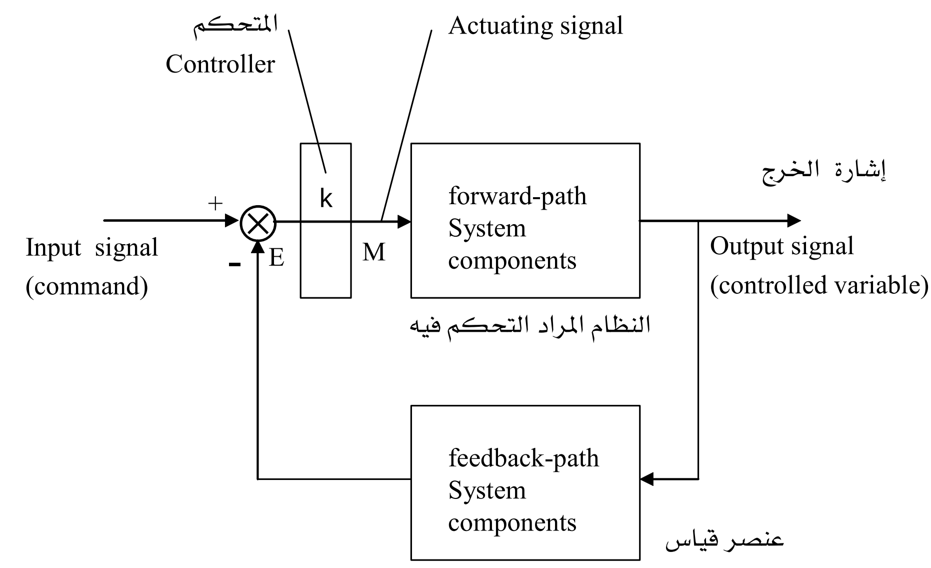


شكل(1-15) نظام تحكم ذو دائرة مفتوحة

بين شكل (1 -15) العلاقة بين الخرج والدخل لهذه الأنظمة. وكمثال على أنظمة التحكم ذو الدائرة المفتوحة الغسالة الكهربائية التي تعمل بالتوقيت الزمني حسب برنامج معين وفيها لا يتم قياس الخرج وهو درجة نظافة الملابس و كمثال آخر لذلك إشارات المرور وتعتمد دقة هذه الأنظمة على معايرتها و الخبرة بتشغيلها وهي لا تعمل بدقة حين تعرضها إلى تشويش ولا توجد اضطرا بات داخلية أو خارجية في النظام المراد التحكم فيه.

2-5-1. أنظمة التحكم ذو الدائرة المغلقة Closed-loop Control

نظام التحكم ذو الدائرة المقفلة هو نظام تكون فيه إشارة الخرج لها تأثير مباشر على عملية التحكم. بمعنى أن أنظمة التحكم ذات الدائرة المقفلة هي أنظمة تحكم ذات تغذية خلفية.



شكل(1-16) نظام تحكم ذو دائرة مغلقة

ويبين شكل (1 -16) الرسم التخطيطي block diagram لتمثيل نظام تحكم ذو دائرة مقفلة ، وفيه فان إشارة الفرق بين الدخل وإشارة التغذية الخلفية E تقوم بتشغيل المتحكم K controller ليؤثر على الوحدة أو النظام المراد التحكم plant للعمل على تقليل الخطأ بين الدخل و الخرج ضبط الخرج عند القيمة المطلوبة. ويجب ملاحظة أن عنصر القياس هنا (أو جهاز القياس) يقوم بقياس الخرج وتحويله إلى إشارة تماثل إشارة الدخل في الوحدات والكميات حتى يمكن مقارنة الدخل والخرج في عنصر المقارنة. ويسمى الدخل هنا عادة الدخل المقارن وذلك لأنه يتم مقارنته مع إشارة التغذية الخلفية التي هي الخرج بعد قياسه وتحويله إلى إشارة ممكن مقارنتها بالدخل. ومن أمثلة عناصر المقارنة هو المكبر الإلكترونيoperational amplifier وهناك عناصر مقارنة ميكانيكية وأجهزة الهواء المضغوط وخلافه.

ونظرا لأن إشارة التحكم Mالخارجة من المتحكم تكون عادة قيمتها صغيرة فإننا نستخدم مكبر قدرة (كهربائي أو ميكانيكي) ليستطيع التأثير على النظام المراد التحكم فيهplant . وهذا المكبر غير مبين في الرسم.

6-1. مقارنة بين أنظمة التحكم ذات الدائرة المفتوحة والمغلقة

أ - تتميز أنظمة التحكم ذات الدائرة المغلقة باستخدام التغذية الخلفية التي تجعل النظام المتحكم فيه قليل الحساسية للاضطرابات الخارجية والتغيرات الداخلية في معاملات النظام. وعلى ذلك فإنه يمكن استخدام مكونات رخيصة وأقل دقة نسبيا للحصول على نظام تحكم دقيق، وهذا غير ممكن في حالة التحكم ذو الدارة المفتوحة

ب - ومن ناحية استقرار وتوازن الأنظمة فإن التحكم ذو الدائرة المفتوحة يعتبر أسهل في بنائه عن التحكم ذو الدائرة المغلقة، حيث يتطلب التحكم ذو الدائرة المغلقة تصميما خاصا للحفاظ على الاستقرار مع الدقة.

ج - يستخدم نظام التحكم ذو الدائرة المفتوحة عندما يكون الدخل معروف ومحدد وليست هناك أية اضطرا بات متوقعة. وتظهر أهمية وأفضلية نظام التحكم ذو الدائرة المغلقة عند احتمال وجود اضطرا بات غير محددة أو تغيرات غير معروفة في معاملات المكونات. بعض الحالات يستخدم التحكم ذو الدائرة المفتوحة لتقليل النفقات، وفى حالات أخرى يكون الجمع بين التحكم ذو الدائرة المفتوحة والتحكم ذو الدائرة المغلقة اقل تكلفة مع إعطاء نتائج وخصائص مرضية لنظام التحكم.

1-6-1. التحكم ذو التغذية الخلفية (أو المرتدة) Feedback Control

التحكم ذو التغذية الخليفة هو عملية تؤدي إلى تقليل الفرق بين خرج النظام output والدخل المقارن reference input وذلك عند تعرض نظام التحكم إلى اضطرا بات . وتتم هذه العملية على أساس تحديد الفرق بين الدخل والخرج والعمل على تقليله. والمقصود بالاضطرابات هنا هو النوع غير المعروف مسبقا.

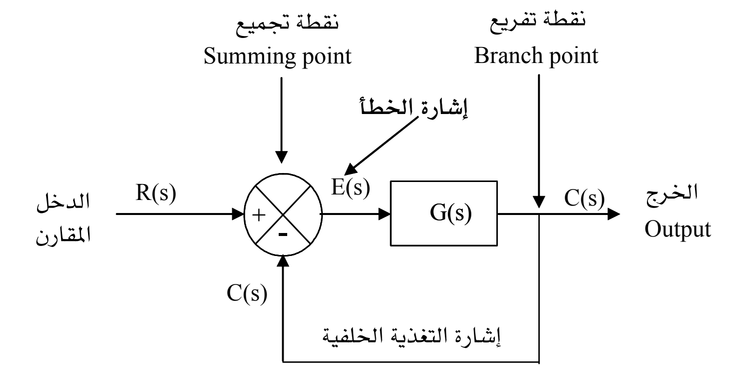
2-6-1. أنظمة التحكم ذات التغذية الخلفية Feedback Control Systems

نظام التحكم ذو التغذية الخلفية هو نظام يؤدي إلى الحفاظ على علاقة محددة بين الخرج والدخل وذلك بمقارنتها واستخدام الفرق بينهما كوسيلة للتحكم. وأنظمة التحكم ذات التغذية الخلفية منتشرة في جميع المجالات الهندسية والمجالات الأخرى. ويعتبر الإنسان أرقى وأعقد نظام تحكم ذو تغذية خليفة.

7-1. المخطط الصندوقي لنظام التحكم ذو ا لدائرة المغلق

Block Diagram of a Closed-loop Control System

المخطط الصندوقي لنظام التحكم ذو الدائرة المغلقة كما هو مبين بالشكل (1 -17) تؤخذ فيه إشارة الخرج C(s) وتغذى تغذية خلفية إلى عنصر المقارنة وخرج عنصر المقارنة هو إشارة الخطأ (أو الانحراف) بين الدخل المقارن والخرج أي أن:

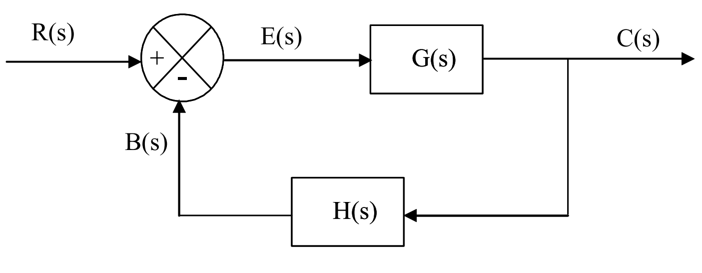


شكل (1-17) المخطط الصندوقي لنظام التحكم ذو الدائرة المغلقة

و من الضروري ملاحظة أن تكون كمية وحدا ت الخرج من نفس نوع الكمية ووحدات ا لدخل قبل دخولها إلى عنصر المقارنة.

أما إذا كانت كمية وحدات الخرج مختلفة عن كمية وحدات الدخل فإنه يلزم وضع وسيلة (أو عنصر) ربما يكون جهازاً لتحويل إشارة الخرج لكي تكون من نفس نوع الدخل والذى يمثل بدالة التحويل H(s) كما هو مبين بالشكل (3 - 6). ويكون دخل هذا العنصر هو خرج نظام التحكم C(s) أما خرجه فيكون إشارة التغذية الخفية B(s) أي أن:

$$B(s) = H(s)C(s) \qquad (3-5)$$



شكل (1-18) نظام تحكم ذو الدائرة المغلقة

وبدراسة الشكل (1 -18) يمكن إيجاد دوال التحويل الآتية:

ا - دالة التحويل الأمامية Direct or forward transfer function

$$G(s) = \frac{C(s)}{E(s)} \qquad (3-6)$$

2 - دالة التحويل الخلفية feedback transfer function

$$H(s) = \frac{B(s)}{C(s)} \qquad (3-7)$$

3 - دالة التحويل للدائرة المفتوحة transfer function open-loop

$$G(s)H(s) = \frac{B(s)}{E(s)} \qquad (3-8)$$

4 - دالة التحويل للدائرة المغلقة transfer function closed-loop

إذا كانت دالة التحويل الخلفية في الشكل (1 -18) مساوية للواحد $H(s) = 1$ فإن معادلة (3 -7) ومعادلة (3 -8) تعطي الآتي:

$$\begin{aligned} C(s) &= G(s)E(s) \\ E(s) &= R(s) - B(s) \end{aligned} \qquad (3-9)$$

بالتعويض عن المعادلة (3 -5) في المعادلة (3 -9) ينتج:

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s)$$

وعليه فإن:

$$C(s) = G(s)E(s)$$
$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)$$
$$C(s) = G(s)R(s) - G(s)H(s)C(s)$$
$$C(s) + G(s)H(s)C(s) = G(s)R(s)$$
$$[1 + G(s)H(s)]C(s) = G(s)R(s)$$

بذلك تكون دالة التحويل للدائرة المغلقة كالتالي:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \qquad (3\text{-}10)$$

ويكون خرج نظام التحكم ذو الدائرة المغلقة كالتالي:

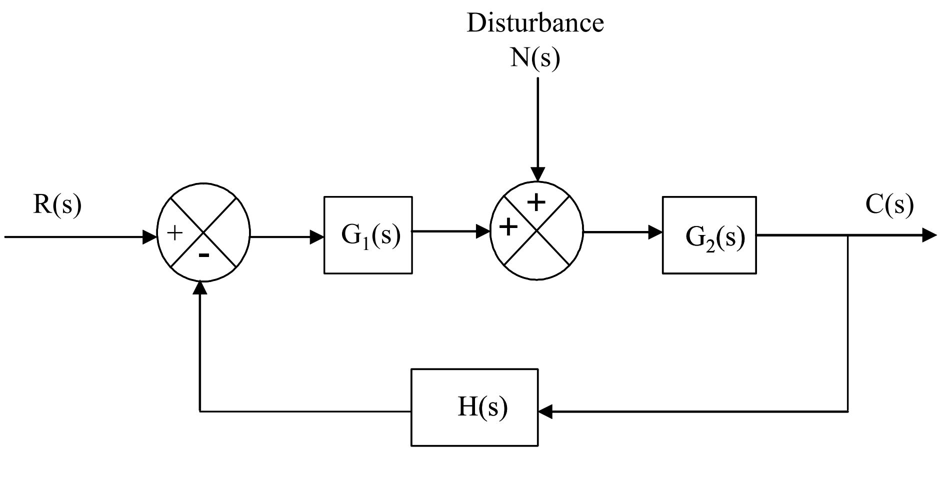
$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) \qquad (3\text{-}11)$$

8-1. نظام التحكم ذو الدائرة المغلقة والمعرض لاضطراب
Closed-loop Control System Subjected to a disturbance

في نظام التحكم ذو الدائرة المغلقة والمتعرض إلى اضطراب والذي يرمز له بالرمز $D(s)$ كما هو مبين بالشكل (1 -19) فيكون في هذه الحالة خرج النظام يتكون من جزئين، أولهما نتيجة الدخل R(s) وثانيهما نتيجة الاضطرابات D(s) ولإيجاد هذا الخرج نتبع الآتي:

أ -نفرض أولا أن النظام يتعرض إلى الدخل R(s) فقد وان إشارة الاضطرابات = صفر ونوجد الجزء من الخرج نتيجة الدخلR(s) .

ب - ثم نفرض أن الدخل =R(s) صفر وان النظام يتعرض فقد إلى الاضطرابD(s) ، ونوجد الجزء من الخرج نتيجة D(s).



شكل (1-19) نظام تحكم ذو الدائرة المغلقة ومعرض لاضطراب

وبفرض أن $C_R(s)$ هو جزء الخرج نتيجة الدخل R(s) فقط . وأن $C_D(s)$ هو جزء الخرج نتيجة الدخل D(s) فقط . وعلى ذلك فإن الجزئين من الخرج يمكن إيجادهما من المعادلتين (3 -12) و(3 -13) كالتالي:

$$\frac{C_n(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} \qquad (3\text{ - }12)$$

$$\frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \qquad (3\text{-}13)$$

وعلى ذلك فإن الخرج الكلى يكون عبارة عن مجموع الجزأين من الخرج نتيجة كل من الدخل R(s) والاضطراب D(s) كالآتي:

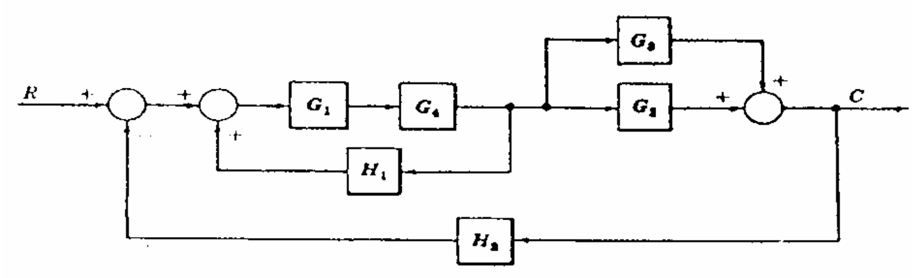
$$\begin{aligned} C(s) &= C_R(s) + C_N(s) \\ &= \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}[G_1(s)R(s) + N(s)] \end{aligned} \qquad (3\text{-}14)$$

1-9. تبسيط المخططات الصندوقية المعقدة Reduction of Complicated Block Diagrams

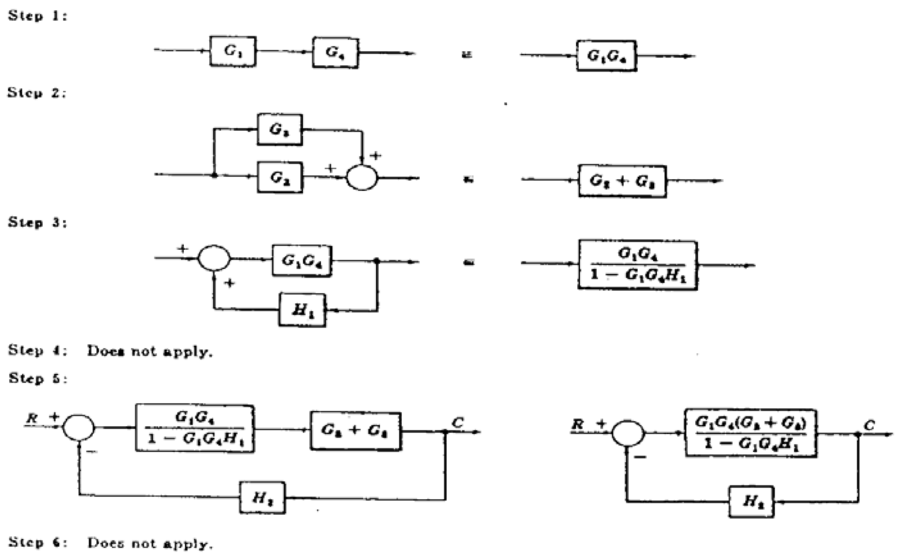
في معظم أنظمة التحكم الكبيرة ذوات التغذية الخلفية يكون المخطط الصندوقى الناتج كبير ومعقد لأنه يحتوي مجموعة كبيرة من المسارات الأمامية والخلفية وعدد كبير من إشارات الد خل والخرج لجميع أجزاء النظام . ولتبسيط واختصار هذه المخططات الكبيرة يجب استخدام القواعد المبينة بالجدول (3 - ا) والذى يبين الرسم الأصلى للمخطط الصندوقي والرسم المكافىء له في جميع الحالات المتوقعة. وفي جميع الأحوال يكون الهدف في كل اختصار هو الوصول إلى الشكل المعتاد والقانوني لمخطط التغذية الخلفية والمبين في الشكل (1 -18) وهذا يتطلب دراسة كل جزء من أجزاء النظام الأصلي ومحاولة الوصول بهذا الجزء الى تحويلة من التحويلات المذكورة بالجدول (3 - ا).

مثال(1 -11):

اختصر المخطط الصندوقي الآتي إلى أبسط صورة

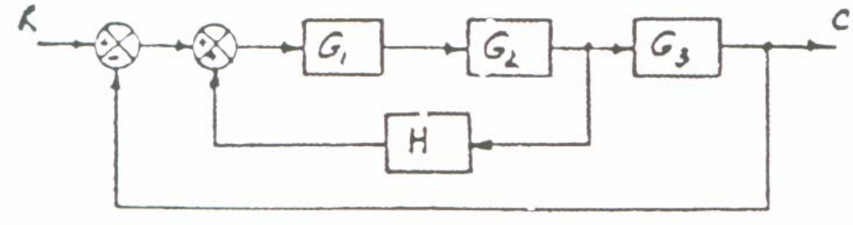


الحل

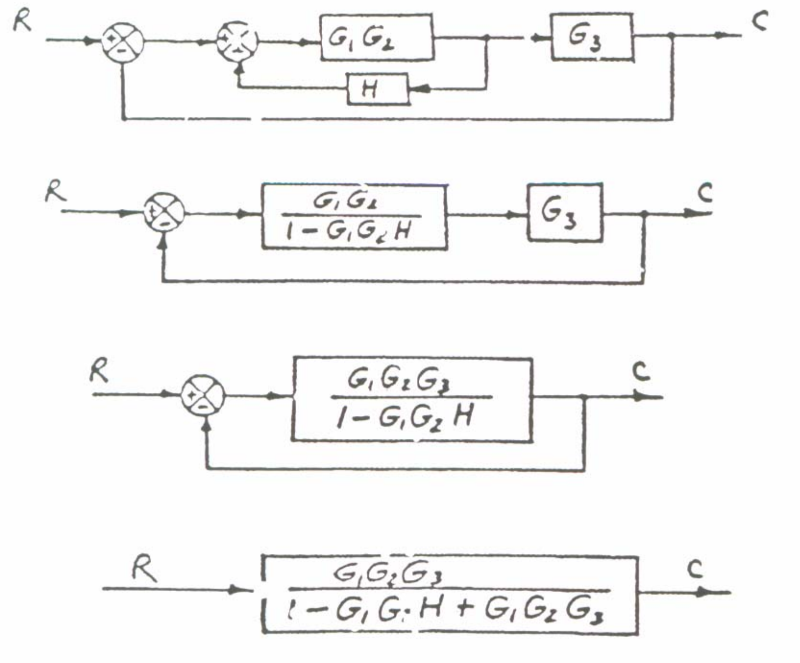


مثال (1 -12):

في المخطط الصندوقي المبين احسب العلاقة بين R ، C باستخدام قواعد التبسيط والاختصار لأبسط صورة.



الحل:



وقد تم الحصول على الشكل (د) من الشكل (ج) كالتالي:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{G_1G_2G_3}{1-G_1G_2H}}{1+\frac{G_1G_2G_3}{1-G_1G_2H}}$$

بضرب البسط والمقام في $(1-G_1G_2H)$ نجد أن:

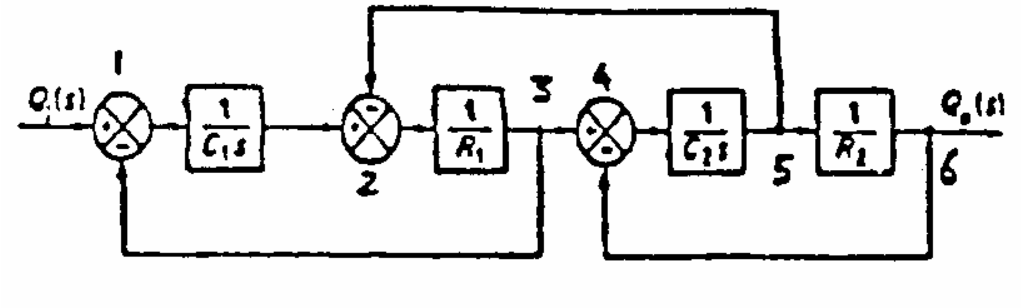
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2H+G_1G_2G_3}$$

مثال (1 -13):

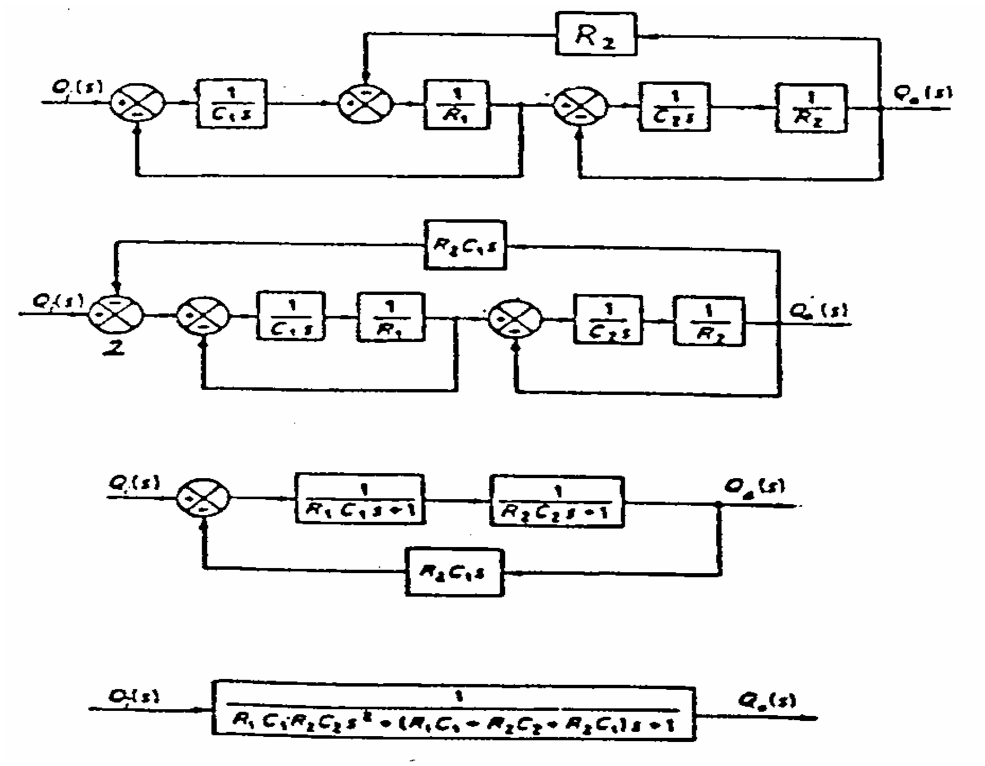
يبين المخطط الصندوقي لنظام تحكم ذو تغذية خلفية. اختصر هذا المخطط إلى أبسط صورة.

مثال (1 -14):

اختصر المخطط المبين في الشكل إلى أبسط صورة.

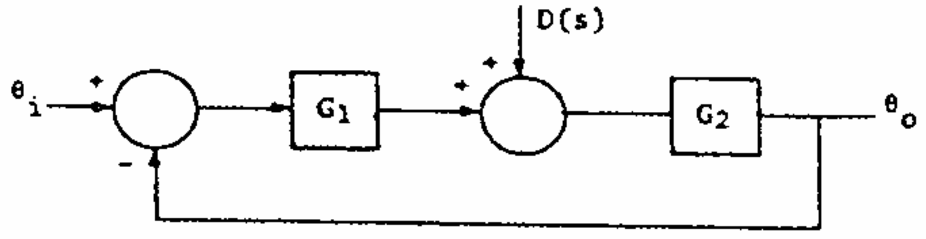


الحل:



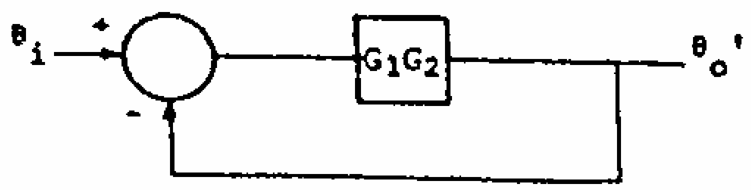
مثال(1 -15):

اختصر المخطط المبين بالشكل التالي إلى أبسط صورة ثم احسب دالة التحول.

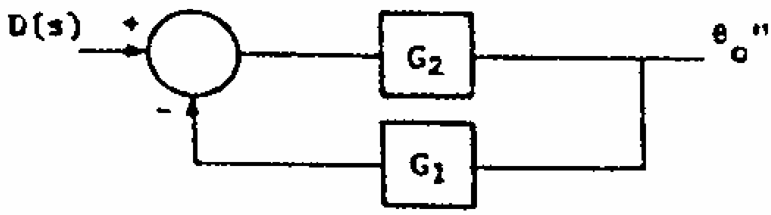


(a)

الحل:



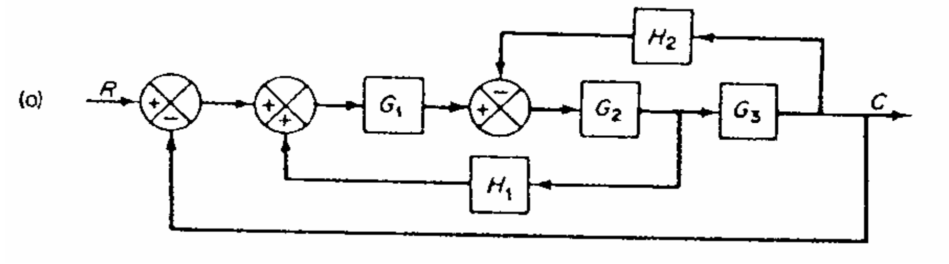
(b)



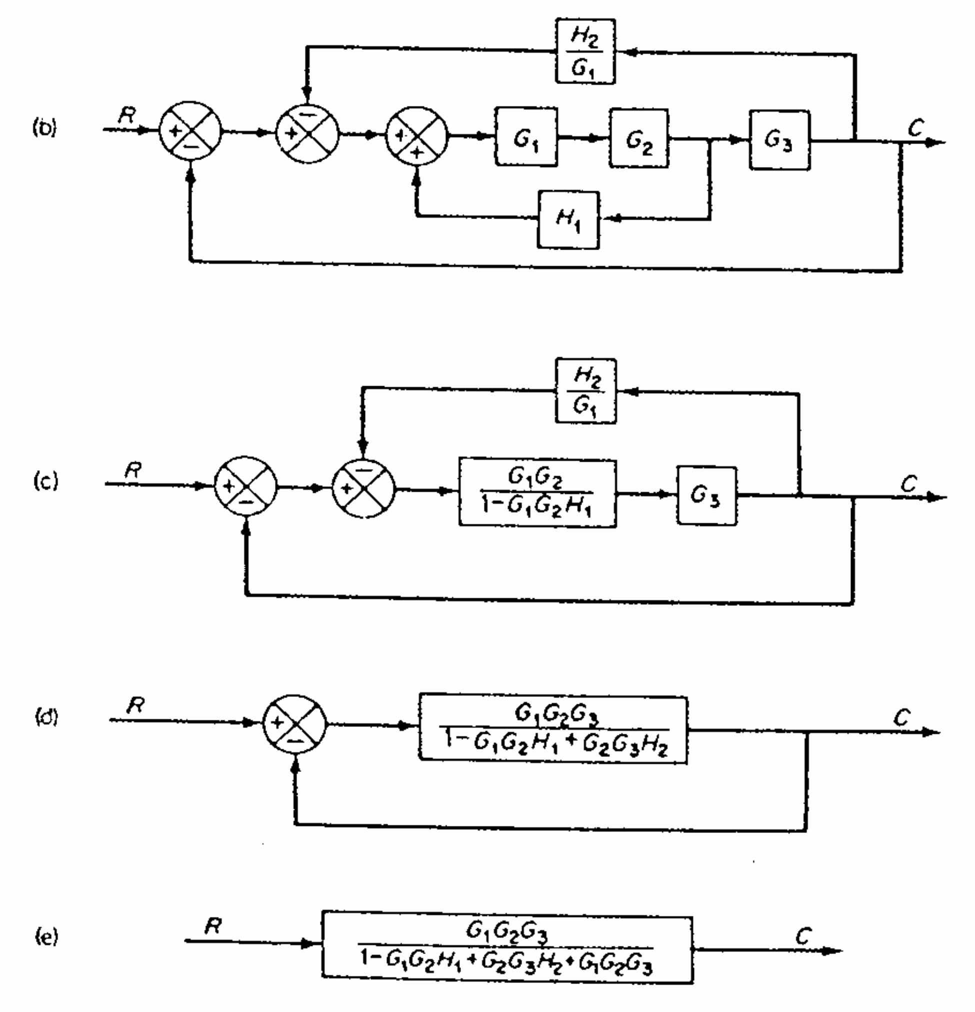
(c)

مثال(1 -16):

اختصر المخطط المبين في الشكل إلى أبسط صورة ثم احسب دالة التحويل $\frac{C}{R}$.



الحل:



تمارين

1 - اذكر الأنواع الرئيسة لأنظمة التحكم وما الفرق بينهم ؟

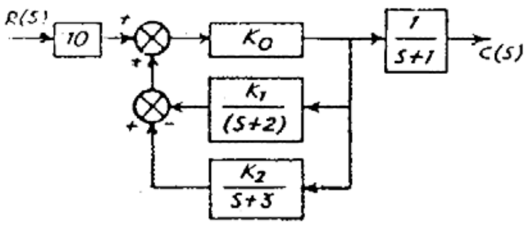
2 - اذكر مميزات وعيوب أنظمة التحكم ذو الدائرة المفتوحة؟

3 - قارن بين أنظمة التحكم ذات الدائرة المفتوحة والمغلقة ؟

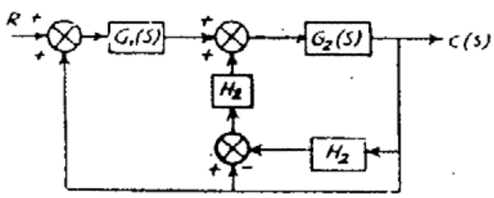
4 - هل نظام التحكم ذو الدائرة المغلقة أكثر دقة من مثيله ذو الدائرة المفتوحة ؟

5 - اذكر أمثلة لأنظمة التحكم ذو الدائرة المفتوحة والمغلقة في الحياة العملية بالمنازل؟

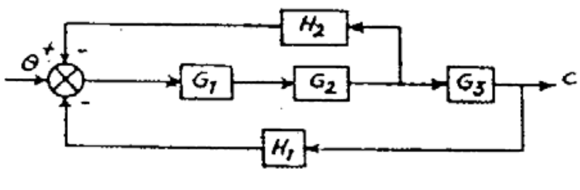
6 - اختصر المخطط الصندوقي التالي إلى أبسط صورة ثم أوجد دالة التحويل.



(a)

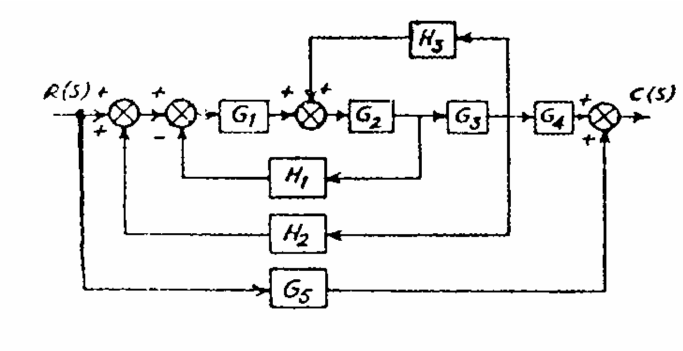


(b)

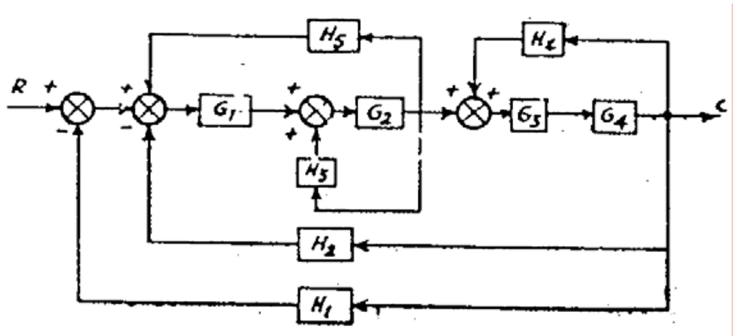


(c)

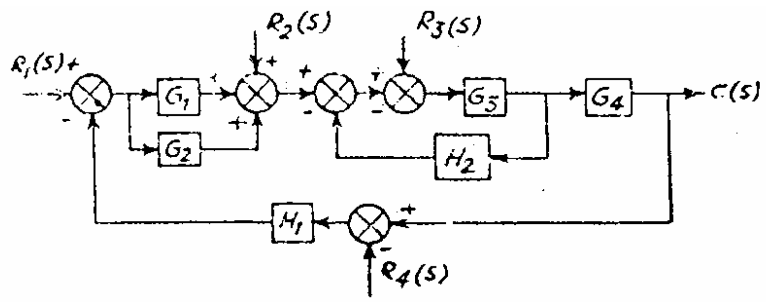
7 - في نظام التحكم ذو التغذية الخلفية المبين بالشكل أوجد دالة التحويل بعد تبسيط المخطط.



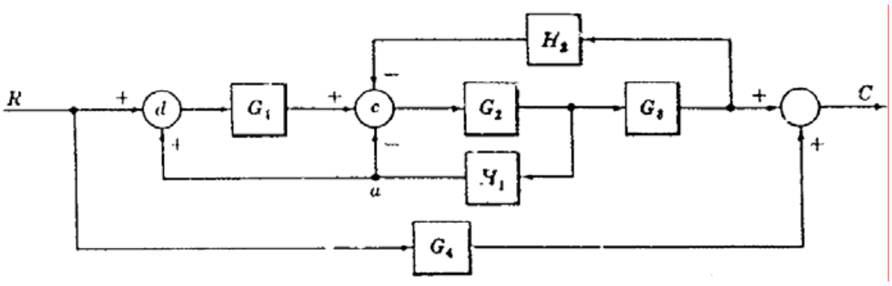
8 - اختصر المخطط الصندوقي التالي ثم احسب $\frac{C(s)}{R(s)}$.



9 - في نظام التحكم متعدد الدخل بالشكل أوجد الخرج C(s).

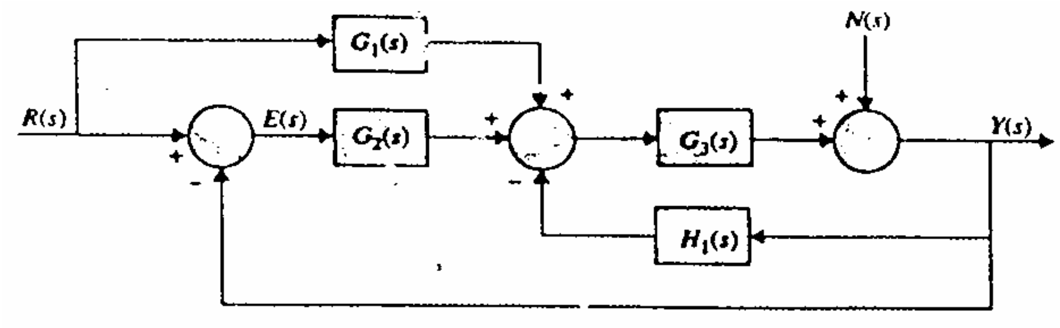


10 - اختصر المخطط الصندوقي المبين بالشكل الى مخطط صندوقى ذو دائرة مفتوحة.



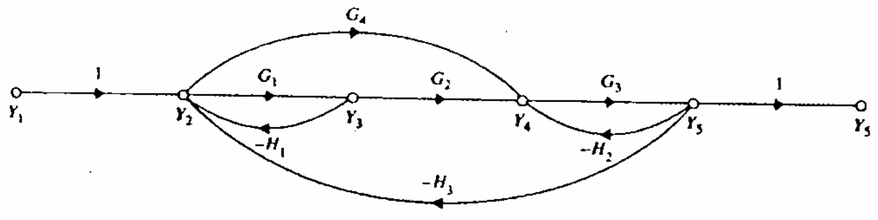
11 - ارسم مخطط التدفق للمخطط الصندوقى المبين بالشكل ثم أوجد دوال التحويل الآتية باستخدام قاعدة ماسون:

$$\left.\frac{Y(s)}{R(s)}\right|_{N=0},\quad \left.\frac{Y(s)}{N(s)}\right|_{R=0},\quad \left.\frac{E(s)}{R(s)}\right|_{N=0},\quad \left.\frac{E(s)}{N(s)}\right|_{R=0}$$

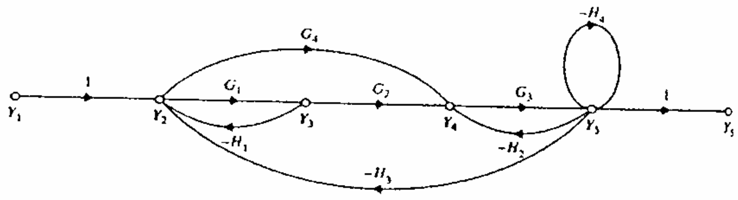


12 - الشكل التالي يبين عدد من مخططات التدفق لعدة أنظمة. استخدم قاعدة ماسون لإيجاد دوال التحويل الآتية:

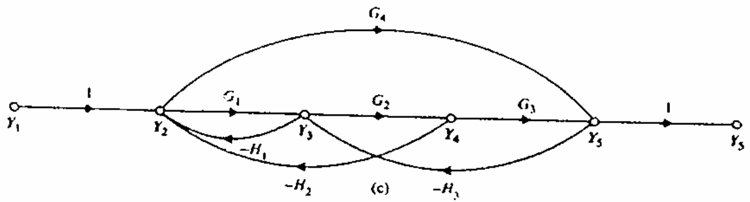
$$\frac{Y_5}{Y_1},\quad \frac{Y_4}{Y_1},\quad \frac{Y_2}{Y_1},\quad \frac{Y_5}{Y_2}$$


G_4
1
G_1
G_2
G_3
1
Y_1
Y_2
Y_3
Y_4
Y_5
Y_5
$-H_1$
$-H_2$
$-H_3$

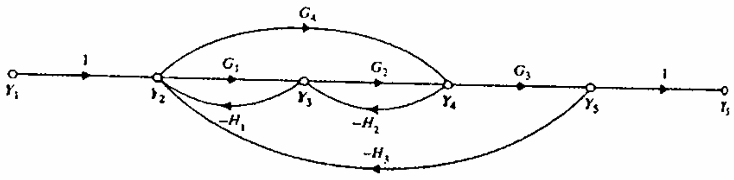
(a)


$-H_4$
G_4
1
G_1
G_2
G_3
1
Y_1
Y_2
Y_3
Y_4
Y_5
Y_5
$-H_1$
$-H_2$
$-H_3$

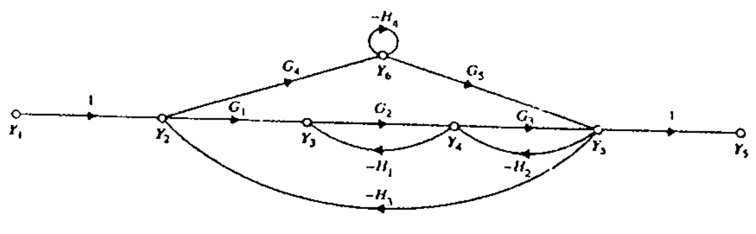
(b)


G_4
1
G_1
G_2
G_3
1
Y_1
Y_2
Y_3
Y_4
Y_5
Y_5
$-H_1$
$-H_2$
$-H_3$

(c)


G_4
1
G_1
G_2
G_3
1
Y_1
Y_2
Y_3
Y_4
Y_5
Y_5
$-H_1$
$-H_2$
$-H_3$

(d)


$-H_4$
G_4
Y_6
G_5
1
G_1
G_2
G_3
1
Y_1
Y_2
Y_3
Y_4
Y_5
Y_5
$-H_1$
$-H_2$
$-H_3$

(e)

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تقنية التحكم الآلي

نظم التحكم الصناعية وخواصها

الوحدة الثانية : نظم التحكم الصناعية وخواصها

الأهداف :

بعد انتهائك من دراسة هذه الوحدة تكون قادرا على:

شرح الغرض من تحويلات لابلاس،

تعريف تحويل لابلاس،

إيجاد تحويل لابلاس لبعض الإشارات الأساسية مثل إشارة الخطوة،

معرفة نظريات التحويل اللالابلاسي

معرفة نمذجة الأنظمة الميكانيكية

معرفة صمامات التحكم

معرفة أنواع المتحكمات الصناعية

1-2. مقدمة

في أنظمة التحكم الأوتوماتيكي يتم مقارنة القيمة الحقيقة للخرج وقيمة إشارة الدخل والفرق بينهما يسمى إشارة الخطأ error signal أو الانحراف. وتوصل إشارة الخطأ إلى المتحكم الذي يقوم بعمل فعل معين لهذه الإشارة (أي تعديلها) ثم ينتج إشارة تحكم توصل عادة عن طريق مكبر إلى النظام المراد التحكم فيه بحيث يعمل نظام التحكم ككل على تقليل الخطأ بين الدخل والخرج أو يجعل هذا الخطأ صفر ويصبح الخرج مساويا للدخل. والطريقة التي يستخدمها المتحكم لإنتاج إشارة التحكم تسمى فعل المتحكم ونظرا لأن إشارة الخطأ تكون عادة ذات قدرة صغيرة فإنه في كثير من الحالات يستخدم مكبر لتكبير قدرة هذه الإشارة لكي تستطيع التأثير على النظام المراد التحكم فيه.

وفي معظم أنظمة التحكم الآلي الصناعية تستخدم الكهرباء أو الموانع المضغوطة مثل الزيت أو الماء للحصول على القدرة اللازمة لتشغيل نظام التحكم. ويمكن تقسيم أنظمة التحكم طبقا لنوع مصدر القدرة المستخدم في التشغيل مثل:

1 - أنظمة التحكم التي تعمل بالهواء المضغوط.
2 - أنظمة التحكم الهيدروليكية.
3 - أنظمة التحكم الكهربية.
4 - أنظمة التحكم الالكترونية الحديثة.
5 - التحكم باستخدام الكمبيوتر.

ويتوقف استخدام نوع معين من أنظمة التحكم على طبيعة الموقع وأحوال التشغيل بالإضافة إلى اعتبارات الأمن والتكاليف والدقة والوزن والحجم وخلافه. وهناك أنواع مختلفة من أنظمة التحكم مثل الأنظمة الكهربائية والميكانيكية والأنظمة الكهربائية الهيدروليكية وكذلك الأنظمة الالكترونية الهوائية وخلافه. وفى هذه الأنظمة نستخدم مكونات وأجهزة عديدة متنوعة للحصول على مواصفات أداء عالية وتكلفة مناسبة لأنظمة التحكم. وفى الوقت الحاضر يستخدم الكمبيوتر للتحكم في العديد من الصناعات الحديثة وشبكات ومحطات الكهرباء وخلافه نظرا لدقته الفائقة وإمكانياته الكبيرة لتنفيذ متطلبات التحكم المتطورة.

2-2. تحويل لابلاس LAPLACE TRANSFORMATION

1-2-2. مقدمة Introduction

التحويل اللابلاسى Laplace Transform طريقة تستخدم بشكل مفيد لحل الدوال والمعادلات الرياضية والتفاضلية، وباستخدام التحويل اللابلاسى يمكن تحويل دوال مثل الدوال الجيبية Sinusoidal Function والدوال الآسية Exponential Functions, وغيرها من الدوال إلى دوال جبرية Algebraic Functions في متغير مركب Complex Variable يرمز له بالرمز (S) والعمليات الرياضية مثل التفاضل، والتكامل يمكن أن تبدل أيضا بعمليات جبرية في مستوى مركب يسمى S-plane.

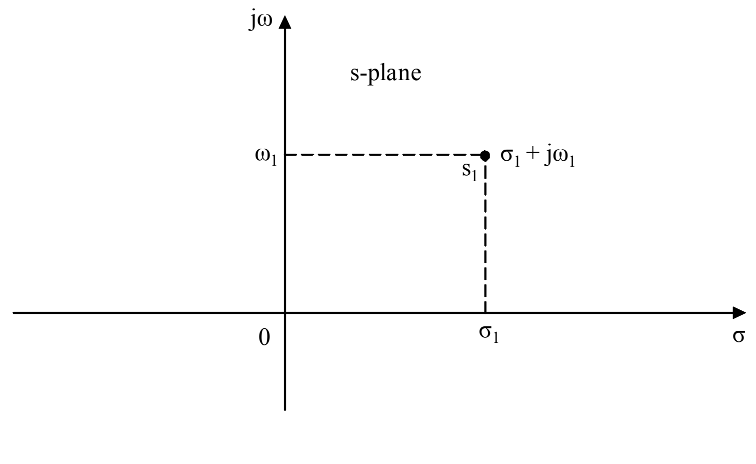
2-2-2. المستوى المركب إس Complex S-plane

نظرية المتغير المركب complex variable عندما تطبق على نظام التحكم تعطى كل المعلومات المطلوبة لتحليل وتصميم النظام. يتكون المتغير المركب من جزئين:

أ - جزء حقيقي Real Part ويرمز له بالرمز σ.

ب جزء تخيلي Imaginary Part ويرمز له بالرمز $j\omega$.

يرسم الجزء الحقيقي على الإحداث الأفقي x-axis بينما يرسم الجزء التخيلي على الإحداث الرأسي Y-axis كما هو مبين بالشكل (2 -1) والذي يسمى المستوى المركب إس S-plane.



شكل2-1 المستوى المركب S-plane

وتكون الدالة التي تحتوى على هذا المتغير المركب هي $G_{(s)}$ وتسمى دالة المتغير المركب وتحتوي على جزئين إحداهما حقيقي والآخر تخيلي إذا كانتS تحتوى على نفس الجزئين ويعبر عنها كالتالي:

$$G_{(s)} = \text{Re}\ G_{(s)} + \text{Im}\ G_{(s)} \qquad (1-2)$$

ويمكن كتابة المعادلة (2 - 1) كالتالي:

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + ... + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + ... + a_n}$$

وبعد تحليل البسط والمقام تصبح المعادلة كالتالي:

$$G(s) = K\frac{(s - z_1)(s - z_2)........(s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2)........(s - p_n)} \qquad (2-2)$$

وهذه الدالة يمكن أن تمثل على المستوى المركب S-plane بعد حل معادلة البسط والمقام وإيجاد الجذور (قيم المتغير s المخلفة) فتكون قيم s للمقام ($P_1\ P_2, \ldots, P_m$) تسمى أقطاب المعادلة poles ويرمز لها بالرمز (X) أما قيم X للبسط ($Z_1, Z_2, \ldots, Z_n$) فتسمى أصفار المعادلة zero ويرمز لها بالرمز (O). ومن الجدير بالذكر أن القطب pole يلعب دور أساسيا في دراسة نظرية التحكم للأنظمة المختلفة.

مثال 2 -1:

أوجد قيم الأقطاب والأصفار Poles and Zeros للدالة G_s مع رسم هذه القيم على المستوى الركب S-plane حيث:

$$G(s) = \frac{25(s+4)(s+2)}{s(s+3)(s+5)^2}$$

الحل:

نحصل على Poles بمساواة المقام بالصفر كما يلي

$$s(s+3)(s+5)^2 = 0$$

أي أن:

$s_1 = 0,\ s_2 = -3$ (simple poles) and $s_{3,4} = -5$ (second order pole)

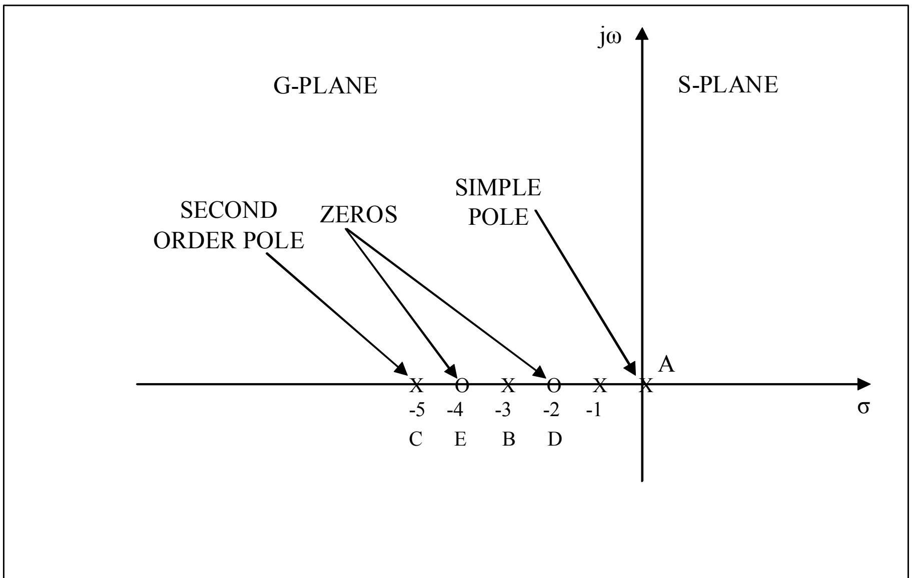
وبمساواة المقام بالصفر نحصل على Zeros كالتالي:

$$25(s+4)(s+2)=0$$

أي إن:

$$s_1=-4\,,s_2=-2\ \ (\text{simple zeros})$$

ويمكن تمثيل هذه القيم على المستوى المركب ينتج الشكل (2 -2) والذي يوضح poles and zero لهذه الدالة.



شكل(2-2)المستوى المركب S-plane مثال(2-1)

مثال 2 -2:

أوجد قيم الأقطاب والأصفار Poles and Zero للدالة $G_{(s)}$ مع رسم هذه القيم على المستوى المركب S-plane حيث:

$$G(s)=\frac{K(s+4)}{(s+6)(s^2+2s-10)}$$

الحل:

بتحليل المقام ينتج:

$$G(s)=\frac{K(s+4)}{(s+6)(s+1+j3)(s+1-j3)}$$

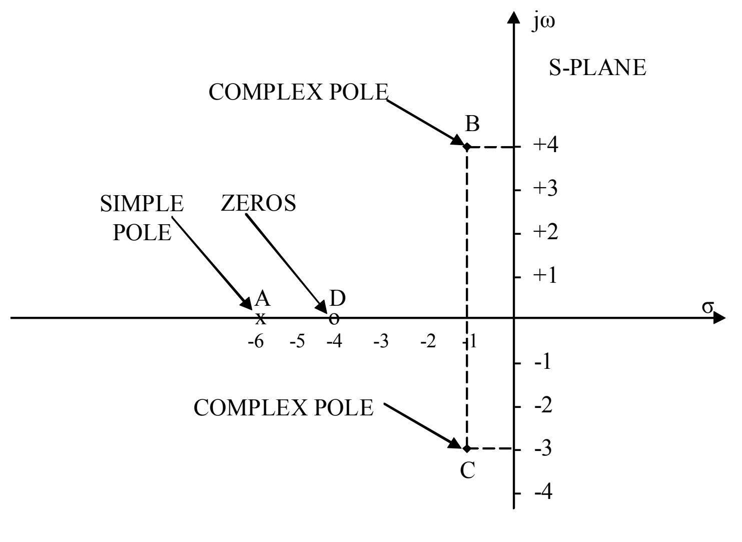
بمساواة المقام بالصفر للحصول على poles كما يلي:

$$(s+6)(s+1+j3)(s+1-j3)=0$$

أي إن:

$$s_1=-6,\ s_2=-1-j3,\ s_3=-1+j3$$

وبتمثيل هذه القيم على المستوى المركب S-plane ينتج الشكل (2 -3) والذي يوضح أماكن poles and zeros لهذه الدالة.



شكل(2-3)المستوى المركب S-plane مثال(2-2)

3-2-2. تحويل لابلاس Laplace Transformation

إن التحويل اللابلاسي يعتمد على تحويل الدوال والمعادلات الرياضية التي توصف أنظمه التحكم من f(t) والتي تكون دوال في الزمن (t) إلى دوال أخرى $F_{(s)}$ في متغير مركب (S). أي أن التحويل اللابلاسى يغير الدالة من المستوى الزمني إلى المستوى المركب - Sوبذلك يكون من السهل على المصمم أن يتعامل مع هذه الدوال والمعادلات في تحليل وتصميم أنظمة التحكم الآلي. فإذا عرفنا الآتي:

f(t) = a function of time t دالة في الزمن

s = a complex variable متغير مركب

رمز للتحويل اللابلاسي L =

التحويل اللابلاسي للدالة F(s) (f(t) =

ويكون التحويل اللابلاسي للدالة f(t) لا بتطبيق المعادلة التالية:

$$l[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (3-\ 2)$$

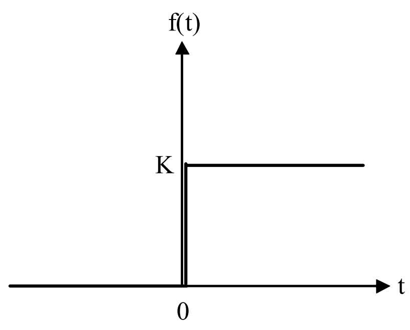
مثال 2 -3:

التحويل الابلاسي لدالة الخطوة Step Functions

بدراسة خواص دالة الخطوة المبينة في الشكل (2 - 4) نجد أنها دالة ثابتة ومفاجئة لا تتغير مع الزمن. ويمكن تمثيلها في التطبيقات العملية بإشارة جهد الدخل لنظام تحكم تكون قيمته صفر قبل التشغيل وتصبح له قيمة معينة وثابتة بعد التشغيل ويمكن التعبير رياضيا عن هذه الدالة كالتالي:

$$f(t) = 0 \qquad \text{for } t \langle 0$$
$$\text{f(t)} = \text{K} \qquad \text{for } t \geq 0$$

حيث إن K مقدار ثابت أوجد التحويل الابلاسي لهذه الدالة ؟



شكل (4-2) دالة الخطوة

الحل:

التحويل اللابلاسي لهذه الدالة يكون كالتالي:

$$\ell[f(t)] = \int K e^{-st} dt$$

$$F(s) = \frac{K}{S} e^{-st} \Big|_{0}^{\infty} = -\frac{K}{S}\left[e^{-\infty} - e^{-0}\right] = \frac{K}{S}$$

$$\ell[f(t)] = F(s) = \frac{K}{S} \qquad \text{if } K = 1 \text{ then } F(s) = \frac{1}{S} \quad \text{(Unit step function)}$$

مثال 2 -4:

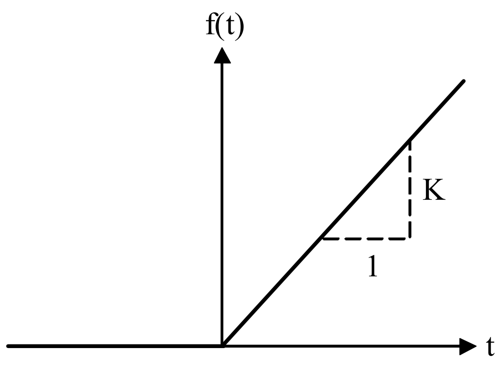
التحويل اللابلاسي لدالة الانحدار Ramp Function

بدراسة خواص دالة الانحدار المبينة في شكل (2 -5) نجد أنها تتزايد مع الزمن (t) بانتظام ويمكن تمثلها في التطبيقات العملية في إشارة الدخل للدوائر الالكترونية والتي تتزايد مع الزمن وكذلك نزايد الأحمال على محطات القدرة الكهربائية في فترات ذروة التشغيل. ويمكن التعبير عن هذه الدالة رياضيا كالتالي:

$$f(t) = 0 \qquad \text{for } t \langle 0$$

$$f(t) = Kt \qquad \text{for } t \geq 0$$

حيث إن K مقدار ثابت. أوجد التحويل اللابلاسي لهذه الدالة ؟



شكل (2-5) دالة الانحدار

الحل:

التحويل اللابلاسى لهذه الدالة يكون كالتالي:

$$F(s)=\frac{K}{s^{2}}$$

وفي حالة ما تكون (k=1) فإن التحويل اللابلاسي يكون:

$$F(s)=\frac{K}{s^{2}} \qquad \text{(Unit - ramp function)}$$

مثال 2 -5:

التحويل اللابلاسي للدالة الآسية Exponential Function

بدراسة خواص الدالة الاسية في شكل (2 -6) نجد أن:

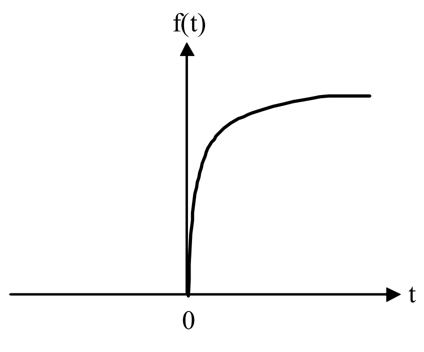
$$f(t)=0 \qquad \text{for } t\langle 0$$

$$f(t)=e^{-Kt} \qquad \text{for } t\geq 0$$

حيث إن K مقدار ثابت. أوجد التحويل اللابلاسي لهذه الدالة ؟

الحل:

التحويل اللابلاسي لهذه الدالة يكون كالتالي:



شكل (6-2) دالة الآسية

$$\ell[f(t)] = \int_0^\infty e^{-kt} e^{-st} dt = \int_c^\infty e^{-(s+k)t} dt$$

$$F(s) = -\frac{1}{S+K} e^{-(s+a)t} \Big|_0^\infty = -\frac{1}{S+K}\left[e^{-\infty} - e^{-0}\right] = \frac{1}{S+K}[0-1]$$

$$\ell[f(t)] = F(s) = \frac{1}{S+K}$$

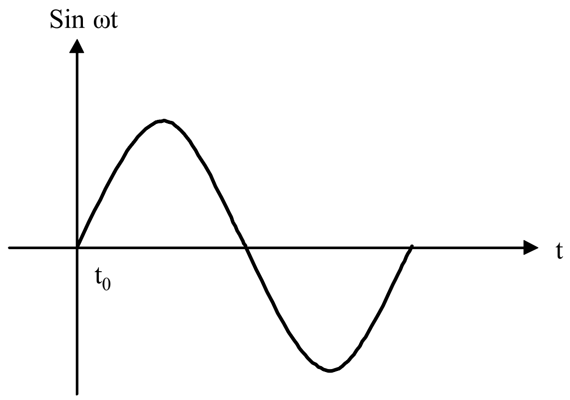
مثال 2 - 6:

التحويل اللابلاسي للدالة الجيبية Sinusoidal Function

بدراسة خواص الدالة الجيبية المبينة في شكل (2 - 7) نجد أن :

$f(t) = 0$ for $t\langle 0$

$f(t) = \sin \omega t$ for $t \geq 0$



شكل (2-7) الدالة الجيبية

حيث إن ω السرعة الزاوية. أوجد التحويل ا للابلاسي لهذه الدالة ؟

الحل:

التحويل اللابلاسي لهذه0 الدالة يكون كالتالي:

$$L[\sin \omega t] = F(s) = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

وكذلك في حالة الدالة ($\cos \omega t$) والتي يعبر عنها كالتالي:

$$f(t) = 0 \qquad \text{for } t\langle 0$$
$$f(t) = \cos\omega t \qquad \text{for } t \geq 0$$

يكون التحويل اللابلاسى لهذه الدالة هو:

$$L[\cos\omega t] = F(s) = \frac{s}{s^2+\omega^2}$$

وهناك جداول للتحويل اللابلاسى والتي تستخدم لتحويل الدوال والمعادلات مباشرة من دالة في الزمن (t) إلى دالة في المتغير (s) كما هو موضح بالأمثلة التالية وكما هو مبين بالجدول رقم (2 -1)

مثال 2 -7:

أوجد التحويل اللابلاسي للدوال الآتية:

$$1-f(t)=15$$
$$2-f(t)=5+4e^{-2t}$$
$$3-f(t)=t-2e^{-t}$$
$$4-x(t)=20\sin 4t$$
$$5-y(t)=2t+\cos t$$
$$6-h(t)=100+14t+8\cos t$$

الحل:

بالنظر في الجدول (2 -1) نجد الآتي:

$$1-F(s)=L[15]=\frac{15}{s}$$
$$2-F(s)=L[5+4e^{-2t}]=L[5]+L[4e^{-t}]$$
$$=\frac{15}{s}+\frac{4}{s+2}=\frac{9(s+10)}{s(s+2)}$$
$$3-F(s)=L[t-2e^{-t}]=L[t]-L[2e^{-t}]$$
$$=(\frac{1}{s^2})-(\frac{2}{s+1})=\frac{(1+s-2s^2)}{s^2(s+1)}$$
$$4-X(s)=L[20\sin 4t]=20[\frac{4}{s^2+4^2}]=\frac{80}{s^2+16}$$
$$5-Y(s)=L[2t+\cos 3t]=\frac{2}{s^2}+\frac{s}{s^2+9}$$
$$6-H(s)=L[100+14t+8\cos t]=\frac{100}{s}+\frac{14}{s^2}+\frac{8s}{s^2+1}$$

	f(t)	F(s)
1	unit impulse $\delta(t)$	1
2	Unit step 1(t)	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
5	te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
6	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
7	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
8	t^n (n=1,2,3,…)	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
9	$t^n e^{-at}$ (t=1,2,3,…)	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\frac{1}{b-a}(e^{-at}-e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
11	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt}-ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
12	$\frac{1}{ab}\left[1+\frac{1}{a-b}(be^{-at}-ae^{-bt})\right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
13	$e^{-at}\sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$
14	$e^{-at}\cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$
15	$\frac{1}{a^2}(at-1+e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
16	$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}}e-^{\zeta\omega_n t}\ \sin\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\,t$	$\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$
17	$\frac{-1}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n t\sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t-\phi)}$ $\phi=\tan^{-1}\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{s}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$

جدول (2 -1)

4-2-2. نظريات التحويل اللابلاسي Laplace Transform Theorems

وفيما يلي بعض خصائص التحويل اللابلاسي والشائعة الاستخدام موضحة في النظريات التالية:

نظرية (1): الضرب في مقدار ثابت Multiplication by a Constant

بفرض أن k مقدار ثابت، F(s) هو التحويل اللابلاسي للدالة f(t) فإن:

$$\mathcal{L}[kf(t)] = kF(s) \qquad (4-\ 2)$$

نظرية (2): الجمع والطرح Sum and Difference

بفرض أن $F_1(s)$ و $F_2(s)$ هما التحويل اللابلاسي للدوال $f_1(t)$ و $f_2(t)$ على التوالي فان:

$$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s) \qquad (5-\ 2)$$

نظرية (3): التفاضل Differentiation

بفرض أن $F(s)$ هي التحويل اللابلاسي للدالة f(t) وأن الدالة f(0) هي قيمتها عند t=0 فإن

$$\mathcal{L}[\frac{df(t)}{dt}] = sF(s) - \lim_{t \to 0} f(t) = sF(s) - f(0) \qquad (6-\ 2)$$

حيث إن f(0) هي القيمة الابتدائية للدالة f(t) محسوبة عند t=0. كذلك فإن التحويل اللابلاسي للتفاضل الثاني للدالة هو:

$$\mathcal{L}[\frac{d^2f(t)}{dt^2}] = sF(s) - sf(0) - f'(0) \qquad (7-\ 2)$$

نظرية (4): التكامل Integration

التحويل اللابلاسي للتكامل الأول للدالة f(t) هو التحويل اللابلاسي للدالة مقسوم على s فان:

$$\mathcal{L}[f(\tau)d\tau] = \frac{F(s)}{s} + \frac{f'(0)}{s} \qquad (8-\ 2)$$

حيث إن $f^{-1}(0)$ هو تكامل الدالة محسوب عند t=0 أي أن: $f^{-1}(0) = \int f(t)dt \quad \text{at } t = 0$

والجدول (2 -1) يبين هذه النظريات والتي تستخدم لتبسيط التحويل اللابلاسي.

5-2-2. تحويل لابلاس العكسي Inverse Laplace Transformation

إن تحويل لابلاس العكسي يعرف بأنه العملية الرياضية التي تستخدم لتحويل الدالة من دالة في المتغير المركب (s) إلى دالة في الزمن (t). ويمكن القول بأنه العملية الرياضية التي يتم فيها تحويل الدالة F(s) إلى الدالة f(t) . ويرمز لهذه العملية بالرمز L^{-1} فنجد أن:

$$L^{-1}[F(s)] = f(t) \quad (2-9)$$

حيث إن:

التحويل اللابلاسي للدالة F(s)=Laplace transformation of f(t)

تحويل لابلاس العكسي L^{-1} = Inverse laplace transformation

مثال 2 -8:

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة $F(s) = \frac{1}{s+10}$

الحل:

باستخدام جدول تحويل لابلاس نجد أن التحويل رقم 4 في الجدول (2 -1) يتناسب مع هذا المثال حيث: a=10 فيكون:

$$f(t) = L^{-1}[\frac{1}{s+10}] = e^{-10t}$$

مثال 2 -9:

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة $F(s) = \frac{27}{s^2+81}$

الحل:

بإعادة كتابة الدالة المعطاة كالتالي: $F(s) = 3\frac{9}{s^2+9^2}$

وباستخدام جدول تحويل لابلاس نجد أن التحويل رقم 6 في الجدول (2 - 1) يتناسب مع هذا المثال وأن هذه الدالة هي دالة جيبية مضروبة في عدد ثابت هو 3 حيث $\omega = 9$ فيكو ن:

خطأ لا يمكن إنشاء كائنات من تحرير رموز الحقول. $f(t) = L^{-1}[F(s)] = 3\sin 9t$

عمليا يتم إيجاد تحويل لابلاس العكسي مباشرة من الجدول (2 -1) مما يوفر الوقت المطلوب لحل المعادلات والدوال الرياضية. ولكن في معظم أنظمة التحكم الآلي تكون الدوال معقدة ومركبة ولايمكن إيجادها مباشرة من جدول تحويل لابلاس. في هذه الحالة فإن الأمر يتطلب تبسيط معادلات الدوال الأصلية وذلك عن طريق تقسيمها إلى أجزاء بسيطة يمكن أن يحول كل جزء مباشرة من جدول تحويل لابلاس ويكون تحويل الدالة الأصلية هو عبارة عن مجموع التحويل اللابلاس لكل جزء على حده. الطريقة المستخدمة لتقسيم هذه الدوال هي طريقة الكسور الجزئية. بالرجوع إلى المعادلة (2 -2) السابق النكر نجد أن :

$$G(s) = K\frac{(s-z_1)\,((s-z_2)..........(s-z_m)}{(s-P_1)(s-P_2)...........(s-P_n)}$$

حيث إن K مقدار ثابت وكل من أقطاب المعادلة وكذلك أصفار المعادلة ($Z_1, Z_2,.....Z_m$) هي مقادير ثابتة وغير متساوية وكذلك درجة البسط أقل من درجة المقام فإن $n \rangle m$ ء. وبتقسيم هذه الدالة إلى أجزاء بسيطة ينتج الآتي:

$$F(s) = \frac{A_1}{s+p_1} + \frac{A_2}{s+p_2} + ... + \frac{A_n}{s+p_{n1}} \quad (10-\ \ 2)$$

حيث إن ($A_1, A_2, ... A_n$) ثوابت يمكن حسابها من المعادلات الآتية:

$$A_1 = \left|(s+p_1).F(s)\right|_{s=-p_1}$$

$$A_2 = \left|(s+p_2).F(s)\right|_{s=-p_2}$$

$$A_n = \left|(s+p_n).F(s)\right|_{s=-p_n}$$

وبالتعويض عن قيم الثوابت $A_1, A_2, ... A_n$ في المعادلة (2 -10) يمكن إيجاد التحويل اللابلاسي العكسي. لهذه الدالة كما يلي:

$$F(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = A_1 e^{-p_1 t} + A_2 e^{-p_2 t} + ... + A_n e^{-p_n t}$$

مثال 2 -10:

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة الآتية:

$$F(s) = \frac{(s+3)}{(s+1)(s=2)}$$

الحل:

يتم كتابة هذه الدالة على الصورة الآتية:

$$F(s) = \frac{A_1}{s+1} + \frac{A_2}{s+2}$$

وتحسب قيم الثوابت A_1, A_2 كالتالي:

$$A_1 = \left|(s+1)\frac{s+3}{(s+1)(s+2)}\right|_{s=-1} = \frac{-1+3}{-1+2} = \frac{2}{1} = 2$$

$$A_2 = \left|(s+2)\frac{s+3}{(s+1)(s+2)}\right|_{s=-2} = \frac{-2+3}{-2+1} = \frac{1}{-1} = -1$$

و بالتعويض عن هذه 1الثوابت في المعادلة الأولى نحصل على:

$$F(s) = \frac{2}{s+1} - \frac{1}{s+2}$$

و بهذه الطريقة فإن الدالة المركبة قد تحولت إلى صورة مبسطة من جزئين ويكون التحويل اللابلاسي العكسي لها هو:

$$F(t) = \mathcal{L}^{-1}[\frac{2}{s+1}] - \mathcal{L}^{-1}[\frac{1}{s+2}]$$

$$f(t) = 2e^{-t} - e^{-2t}$$

مثال 2 -11:

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة الآتية:

$$X(s) = \frac{200}{s(s+10)}$$

الحل:

يتم كتابة هذه الدالة على الصورة الآتية:

$$X(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s+10}$$

وتحسب قيم الثوابت A_1, A_2 كالتالي:

$$A_1 = \left| s\frac{200}{s(s+10)} \right|_{s=0} = \frac{200}{0+10} = 20$$

$$A_2 = \left| (s+10)\frac{200}{s(s+10)} \right|_{s=-10} = \frac{200}{-10} = -20$$

وبالتعويض عن هذه الثوابت في المعادلة الأولى نحصل على:

$$X(s) = \frac{20}{s} - \frac{20}{s+10}$$

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[X(s)] = \mathcal{L}^{-1}[\frac{20}{s}] - \mathcal{L}^{-1}[\frac{20}{s+10}]$$

$$f(t) = 20 - 20e^{-10t}$$

مثال 2 -12:

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة الآتية:

$$Y(s) = \frac{12}{s(s+1)(s+4)}$$

الحل:

يتم كتابة هذه الدالة على الصورة الآتية:

$$Y(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s+1} + \frac{A_3}{s+4}$$

وتحسب قيم الثوابت $A_1, A_2\, A_3$ كالتالي:

$$A_1 = \left| s\frac{12}{s(s+1)(s+4)} \right|_{s=0} = \frac{12}{(0+1)(0+4)} = \frac{12}{4} = 3$$

$$A_2 = \left| (s+1)\frac{12}{s(s+1)(s+4)} \right|_{s=-1} = \frac{12}{1(-1+4)} = \frac{12}{-3} - 4$$

$$A_3 = \left| (s+4)\frac{12}{s(s+1)(s+4)} \right|_{s=-4} = \frac{12}{-4(-4+1)} = \frac{12}{-12} = 1$$

وبالتعويض عن هذه الثوابت في المعادلة الأولى نحصل على:

$$Y(s) = \frac{3}{s} - \frac{4}{s+1} + \frac{1}{s+4}$$

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)] = \mathcal{L}^{-1}[\frac{3}{s}] - \mathcal{L}^{-1}[\frac{4}{s+1}] + \mathcal{L}^{-1}[\frac{1}{s+4}]$$

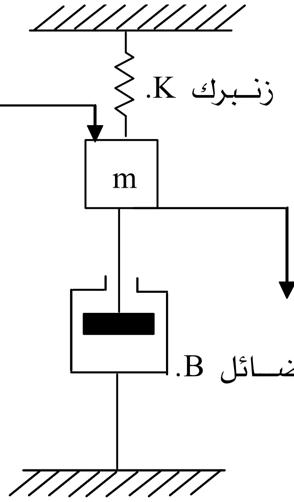
$$y(t) = 3 - 4e^{-t} + e^{-4t}$$

6-2-2. نمذجة الأنظمة الميكانيكية الانتقالية

modeling of translational Mechanical systems

تتكون الأنظمة الميكانيكية الانتقالية كما هو مبين بالشكل (2 -8) من كتلة mass ومضائل dashpot وزنبرك spring. والمضائل يتكون من مكبس piston واسطوانة مملوءة بالزيت لكي يعطى

احتكاك لزج viscous friction أو إخماد للحركة damping عن طريق مقاومة الزيت عند مروره من إحدى جهتي المكبس إلى الجهة الأخرى.



شكل (2 -8) نظام ميكانيكي انتقالي

وعند عمل نموذج رياضي لهذا النظام الميكانيكي أي للحصول على دالة التحويل لابد من تتبع الخطوات الآتية:

1 -يتم كتابة المعادلة التفاضلية لهذا النظام.
2 -يتم إجراء التحويل اللابلاسي للمعادلة التفاضلية مع فرض أن جميع القيم الابتدائية تساوى صفر.
3 -يتم الحصول على دالة التحويل والمعروفة بالنسبة بين الخرج والدخل.

وبتطبيق قانون نيوتن على هذا النظام والذي ينص على أن مجموع القوى المؤثرة على النظام تساوى حاصل ضرب الكتلة في العجلة وتمثل بالمعادلة:

$$\sum F = ma \quad (11-\ 2)$$

حيث إن:

m=mass	الكتلة
a=acceleration	العجلة
force	القوة

وتكون عناصر النظام الميكانيكي انتقالي الحركة هي:

أ - الكتلة (M) Mass

وتعرف الكتلة بأنها الوزن مقسوم على الجاذبية الأرضية

$$M = \frac{w}{s}$$

حيث أن:

الوزن W = weight

الجاذبية الأرضية (g=9.8066) g = gravity

وتكون معادلة القوة المؤثرة على الكتلة $f_m(t)$ كالتالي:

$$f_m(t) = Ma(t) = M\frac{d^2y(t)}{dt^2} = M\frac{dv(t)}{dt} \quad (12-\ 2)$$

حيث أن: V(t) هي السرعة.

ب - الاحتكاك اللزج (B) Viscous Friction

ويعبر عن معادلة القوة الناتجة عن الزنبرك $f_B(t)$ كالتالي:

$$f_B(t) = B\frac{dy(t)}{dt} \quad (13-\ 2)$$

حيث إن

معامل الاحتكاك اللزج B = viscous friction

الازاحة الخطية التي تتحركها الكتلة y(t) = displacement

ج - الزنبرك الخطى (K) Linear Spring

يعبر عن معادلة القوة الناتجة عن الزنبرك $f_k(t)$ كالتالي:

$$f_K(t) = Ky(t) \quad (14-2)$$

حيث إن (K) ثابت الزنبرك وبتطبيق قانون نيوتن المبين بالمعادلة (4 -1) على النظام المبين بالشكل (4 -8) ينتج الآتي:

$$\begin{aligned} f &= B\frac{dy}{dt} - Ky = m\frac{d^2y}{dt^2} \\ \therefore\ f &= m\frac{d^2y}{dt^2} + B\frac{dy}{dt} + Ky \end{aligned} \quad (15-2)$$

بإجراء التحويل اللابلاسي للمعادلة (2 -15) كل جزء على حد ينتج أن:

$$\ell[m\frac{d^2y}{dt^2}] = m[s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)]$$

$$\ell[B\frac{dy}{dt}] = B[sY(s) - y(0)]$$

$$\ell[Ky] = KY(s)$$

$$\ell[f] = F(s)$$

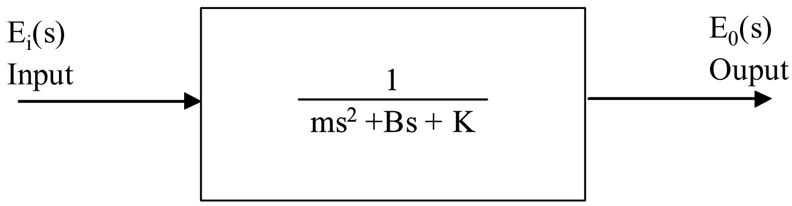
وبفرض أن جميع القيم الابتدائية تساوى صفر أي أن: $y(0) = y(0) = 0$

$$(ms^2 + Bs + K)Y(s) = F(s) \quad (16-2)$$

وتكون دالة التحويل باعتبار أن القوة المؤثرة على الكتلة هي الدخل وأن الإزاحة التي تتحركها الكتلة هي الخرج كما هو مبين بالمعادلة (4 -7):

$$T.F. = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + Bs + K} \quad (17-2)$$

ويكون المخطط الصندوقي لهذا النظام كالتالي:

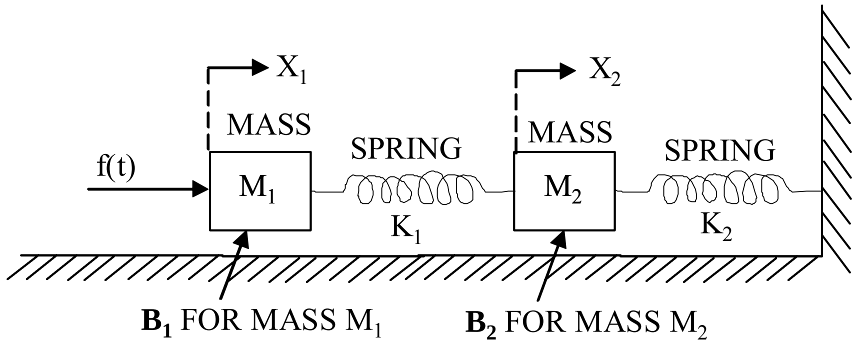


شكل (2 -9) المخطط الصندوقي لنظام ميكانيكي انتقالي

مما سبق يتضح أن القوة التي يعطيها الزنبرك Ky تناسب مع الإزاحةy طرديا وتكون بالسالب لأنها تقاوم حركه النظام. كذلك المضائل يعطي قوة B(dy/dt) تناسب مع السرعة (dy/dt) طرديا وتكون أيضا إشارتها سالبة . وكذلك يمكن إجرا ، التحويل اللاللابسى مباشرة للمعادلات التفاضلية طالما فرضنا أن القيم الابتدائية تساوى صفر وذلك بوضعs بدلا من التفاضل الأول (d/dt) ووضع s^2 بدلا من التفاضل الثاني (d^2/dt^2)وهكذا كما هو مبين في المعادلة (6 -4).

مثال (2 -13):

اكتب المعادلات التفاضلية للنظام الميكانيكي المبين بالشكل (2 -10) مع إيجاد دالة التحويل لهذا النظام.



شكل (2 -10) نظام ميكانيكي انتقالي

الحل:

المعادلة التفاضلية الأولى بالنسبة إلى نقطة الإزاحة x_1

$$f(t) = M_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} + B_1 \frac{dx_1}{dt} + K_1(x_1 - x_2)$$

المعادلة التفاضلية الثانية بالنسبة إلى نقطة الإزاحة x_2

$$0 = M_2 \frac{d^2x_1}{dt^2} + B_1 \frac{dx_1}{dt} + K_1(x_1 - x_2)$$

بإجراء التحويل اللابلاسي للمعادلتين ينتج أن :

$$F(s) = (M_1s^{2+}B_1s + K_1)X_1(s) - K_1X_2(s)$$

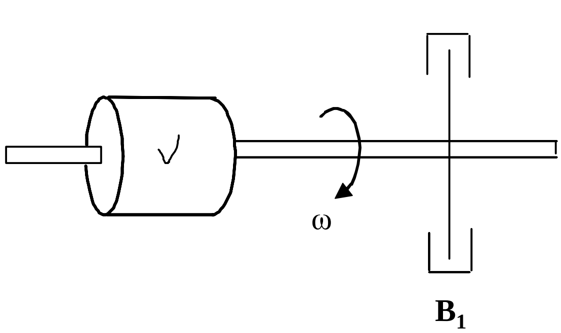
$$0 = (M_2s^2 + B_2s + K_2)X_2(s) + (K_2 - K_1)X_1(s)$$

وبالتعويض عن $X_1(s)$ بدلالة $X_2(s)$ يمكن الحصول على دالة التحويل $X_2(s)/F(s)$

7-2-2. نمذجة الأنظمة الميكانيكية الدورانية

Modeling of Rotational Mechanical Systems

بدراسة النظام الميكانيكي الدوار المبين بالشكل (2 - 11) نجد أنه يتكون من عزم قصور ذاتي لحمل ميكانيكي يدار بعمود دوران بسرعة دو رانية angular velocity قدرها ω في وجود احتكاك لزج damper وهذا النظام من الناحية العملية يمل الأجزاء الدورانية في المحركات الكهربائية حيث أن T هو العزم الناتج في المحرك وJهو عزم القصور الذاتي للعضو الدوار وBهو معامل الاحتكاك في كراسي المحاور و ω هي السرعة الزاوية.



شكل (2 - 11) نظام ميكانيكي دوراني

حيث إن:

عزم القصور الذاتي للحمل .J=moment of inertia of the load

معامل الاحتكاك اللزج .f=viscous-friction coefficient

السرعة الزاوية لدوران العمود ω angular velocity (rad/sec)

العزم الميكانيكي للنظام T=torque applied to the system

وبالنسبة للأنظمة الميكانيكية الدوارة يتم تطبيق قانون نيوتن في حالة الحركة الدورانية لتمثيل هذا النظام رياضيا للحصول على دالة التحويل والذي ينص على مجموع العزوم المؤثرة على عمود الدوران تساوى حاصل ضرب عزم القصور الذاتى(J) × العجلة الزاوية (α) أي أن:

$$\sum T = J\alpha \quad (18-2)$$

حيث إن:

العجلة الزاوية α =angular acceleration (rad/sec^2)

وتكون عناصر النظام الميكانيكى الدورانى الحركي هى:

أ - عزم القصور الذاتي (J) Inertia

تكون معادلة العزم المؤثرة على جسم له عزم قصور ذاتى $T_J(t)$ كالتالي:

$$T(t) = J\alpha(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} = J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (19-2)$$

حيث إن: $\theta(t)$ هي الإزاحة الزاوية

ب - الاحتكاك اللزج B (velocity friction)

ويعبر عن معادلة العزم $T_B(t)$ كالتالي:

$$T_B(t) = B\frac{d(t)}{dt} \quad (20-\ 2)$$

حيث إن:

معامل الاحتكاك اللزج B=viscous friction
الإزاحة الدورانية = θ(t) angular displacement

ج - الزنبرك الدوراني (K) Torsional Spring

ويعبر عن معادلة العزم الخاصة بالزنبرك كالتالي:

$$T_k(t) = K\theta(t) \quad (21-\ 2)$$

حيث إن (K) ثابت الزنبرك spring constant

وبتطبيق قانون نيوتن المبين بالمعادلة (4 -8) على النظام المبين بالشكل (4 -10) ينتج الآتي:

$$T - B\omega = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (22-\ 2)$$
$$\therefore T = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega$$

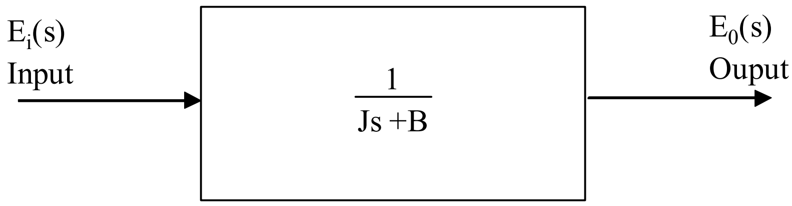
بإجراء التحويل اللابلاسي للمعادلة (2 -22) بفرض أن القيم الابتدائية تساوى صفر، ينتج أن:

$$T(s) = (Js + B)\omega(s) \quad (2-23)$$

على ذلك فإن دالة التحويل باعتبار السرعة الزاوية هي الخرج والعزم هوالدخل هي:

$$\frac{\omega(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js + B} \quad (2-24)$$

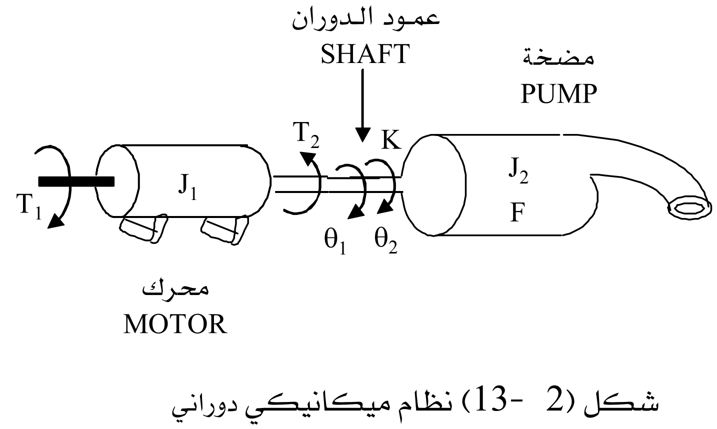
ويكون المخطط الصندوقي لهذا النظام كالتالي:



شكل (2 -12) المخطط الصندوقي لنظام ميكانيكي دوار

مثال (2 -13):

اكتب المعادلات التفاضلية للنظام الميكانيكى المبين بالشكل (2 -13) مع إيجاد دالة التحويل لهذا النظام.



شكل (2 -13) نظام ميكانيكي دوراني

الحل:

بكتابة المعادلات التفاضلية بالنسبة لθ_1 وبالنسبة ل θ_2 على التوالي ينتج أن:

$$T_1 = (J_1 s^2 + K)\theta_1 - K\theta_2$$
$$\theta = K\theta_1 + (Js^2 + Fs + K)\theta_2$$

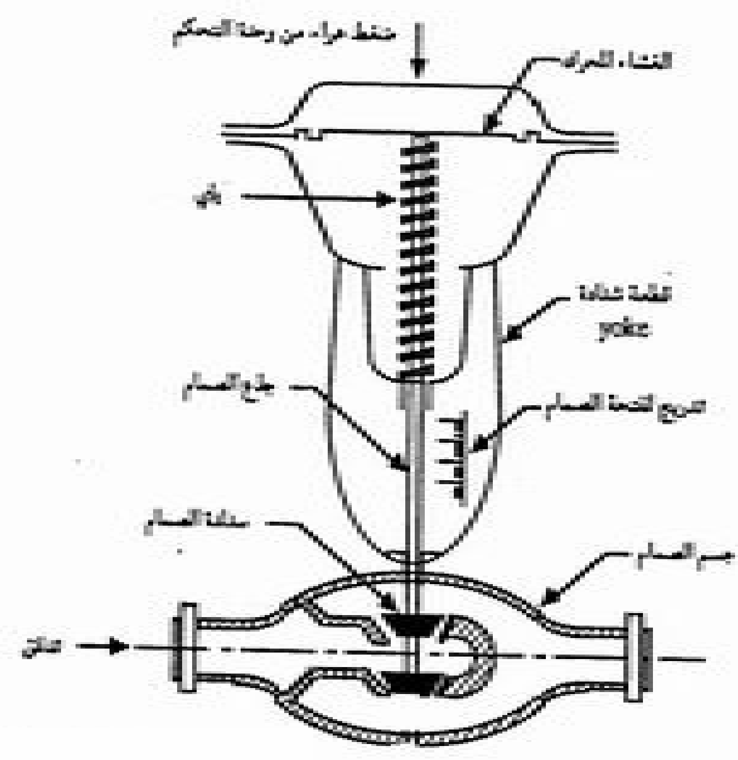
وبالتعويض عن θ_1 بدلالة θ_2 نحصل على دالة التحويل.

3-2. صمامات التحكم Control Valves

والشكل(2 -14) يبين صمام تحكم هوائي، وكما هو واضح من ارسم فإن صمام التحكم الهوائي يتكون من جزئين رئيسيين هما:

المشغل

جسم الصمام Valve Body



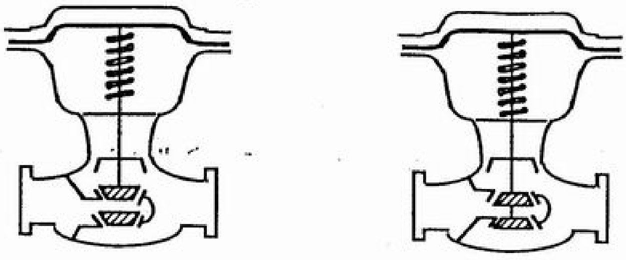
الشكل 2 -14 صمام التحكم الهوائي

فالمشغل يقوم بتحويل إشارة ضغط الهواء إلى حركة عمودية، وجسم الصمام يتحكم في فتحة الصمام ومن ثم مقدار معدل تدفق السائل أو الغاز عبر الصمام.

وكما هو مبين في الشكل 2 -15 تنقسم صمامات التحكم الهوائية إلى نوعين رئيسين هما

صمامات ذات فعل مباشر Direct Action Valves وهي التي تقفل مع زيادة ضغط الهواء

صمامات ذات فعل عاكس Reverse Action Valves وهي التي تفتح مع زيادة الضغط



الشكل 2 -15 نوعي صمامات التحكم الهوائي

تحديد الحجم الأمثل لصمام التحكم Control Valve Sizing

تحديد الحجم الأمثل لصمام التحكم طريقة هندسية متبعة لإيجاد الحجم الصحيح لصمام التحكم اللازم لغرض محدد ، و"معامل تدفق الصمام" الذي عبارة عن كمية السائل التي تمر في الدقيقة عبر الصمام في الوضع المفتوح كاملا مع فرق ضغط psi1 ، وكمثال على ذلك إذا كان معامل تدفق الصمام $C_V=5$ فإن ذلك يعني أنه يتدفق خمسة قالونات في الدقيقة من الماء عندما يكون الصمام كاملا، وفرق الضغط psi1.

ويوضح الجدول(2 -2) قيم معامل تدفق الصمام التقريبية لصمامات تحكم ذات أحجام شائعة.

الجدول(2 -2) حجم الصمام بدلالة معامل التدفق

حجم الصمام	معامل تدفق الصمام C_v
025	0.3
0.5	3
1	14
1.5	35
2	55
3	108
4	174
6	400
8	725
10	1100

ويتم تحديد الحجم الأمثل لصمام التحكم حسب نوع المائع كالتالي:

للسوائل: $$Q_L = C_v\sqrt{\frac{P_1 - P_2}{G_L}}$$

للغازات: $$Q_G = 960C_v\sqrt{\frac{(P_1 + P_2)(P_1 - P_2)}{G_R(T + 460)}}$$

للبخار: $$W = 90C_v\sqrt{\frac{P_1 - P_2}{V_1 + V_2}}$$

حيث:

C_V: معامل تدفق الصمام Valve Flow Coefficient

G_R: معامل الجاذبية للغاز Gas Specific Gravity

G_L: معامل الجاذبية للغاز Liquid Specific Gravity

W: معدل تدفق البخار Steam Flow Rate (lb/hour)

P_1: الضغط عند مدخل الصمام Valve Inlet Pressure (psi)

P_2: الضغط عند مخرج الصمام Valve Outlet Pressure(psi) (psi)

Q_G: معدل تدفق الغاز Gas Flow Rate (ft^3/hour at 14.7psia and 60°F)

Q_L: معدل تدفق السائل Liquid Flow Rate (Gallon/min)

T: درجة حرارة الغاز Gas Temperature (Degree F)

V_1: الحجم النوعي للبخار عند مدخل الصمام Steam Specific Volume at the Valve Inlet (ft^3/lb)

V_2: الحجم النوعي للبخار عند مخرج الصمام Steam Specific Volume at the Valve Outlet (ft^3/lb)

مثال:

أوجد حجم صمام التحكم اللازم للتحكم في تدفق سائل إذا علمت أن G_L=0.92، Qmax=320Galon/lmin، P1-P2=60psi، معامل الأمان Safety Factor=0.25 بمعنى أن QL=1.25Qmax

الحل:

من المعادلة : $Q_L = C_v\sqrt{\dfrac{P_1 - P_2}{G_L}}$

نحصل على $C_v = Q_L\sqrt{\dfrac{G_L}{P_1 - P_2}}$

وبالتعويض عن P1-P2 و QL نحصل على Cv=49.5، ومن الجدول 5 -1 يكون حجم الصمام يساوي 2 inches

4-2. أنواع المتحكمات الصناعية Types of Industrial Controller

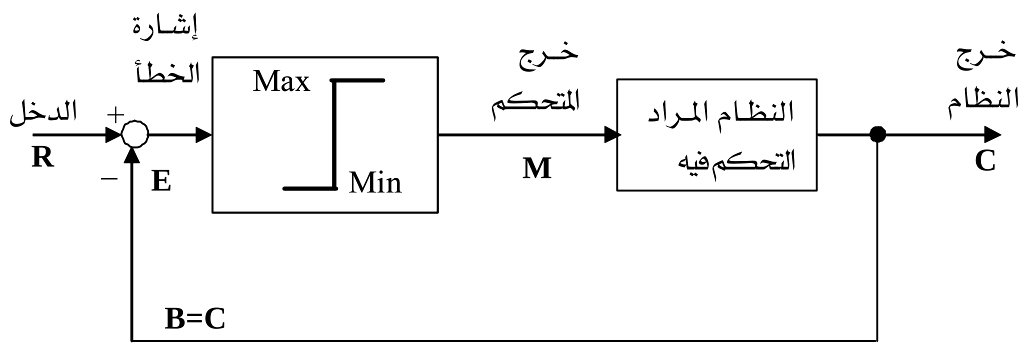
ولما كانت أهمية استخدام المتحكمات في الصناعة غير محدودة فإن هناك أنواع عديدة من هذه المتحكمات يمكن تصنيفها حسب فعل المتحكم وهى كالتالى:

1 - المتحكم ذو الموضعين Two-position (ON-OFF) Controller
2 - المتحكم التناسبي Proportional Controller (P-Controller)
3 - المتحكم التكاملي Integral Controller (I-Controller)
4 - المتحكم التفاضلي Differential Controller (D-Controller)
5 - المتحكم التناسبي التكاملي PI-Controller
6 - المتحكم التناسبي التفاضلي PD-Controller
7 - المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID-Controller

وفيما يلي سوف ندرس كل نوع من هذه الأنواع من حيث نظرية عمله والمعادلات التى تصف عمله ودالة التحويل الخاصة به بالإضافة إلى رسم المخطط الصندوقي وكذلك علاقة إشارة دخل المتحكم بإشارة خرجه.

1-4-2. المتحكم ذو الموضعين Two-position (ON-OFF) Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع كما هو مبين بالشكل (2 -16) على أن يكون خرج المتحكم M في أحد موضعين ثابتين (قيمة عظمى أو قيمة صغرى) ولا يأخذ أي موضع آخر. ومثال لذلك عندما يمر بخار في صمام فإنه قد يكون مفتوح بالكامل ليمر منه البخار أو مغلق بالكامل ليمنع مرور البخار.



شكل (2 -16) نظام تحكم باستخدام المتحكم ذو الموضعين.

ويمكن تمثيل عمل هذا المتحكم بالمعادلات الآتية:

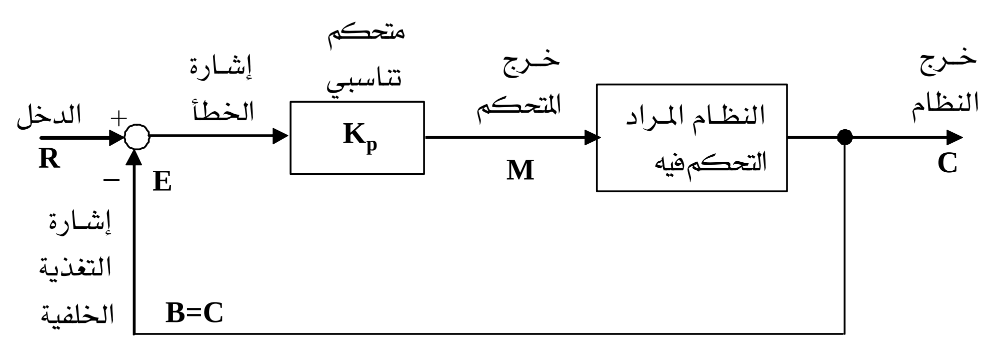
M=Max (قيمة عظمى) for E>0 (25- 2)

M=Min (قيمة صغرى) for E>0 (26- 2)

وهذا يعني أن خرج المتحكم M تكون قيمته عظمى (الوضع الأعلى) في حالة إذا كانت إشارة الخطأ موجبة, وتكون قيمته صغرى في حالة إذا كانت إشارة الخطأ سالبة. ومن أحد التطبيقات التى تستخدم هذا النوع من التحكمات هو التحكم في مستوى المياه في خزان باستخدام عوامة والتى تسبب إغلاق أو فتح دائرة كهربائية كلما قل أو زاد مستوى المياه في الخزان على التوالى, حيث أن الدائرة الكهربائية تكون مسؤولة عن فتح أو قفل صمام دخول المياه للخزان.

2-4-2. المتحكم التناسبي (Proportional Controller (P-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع كما هو مبين بالشكل (2 -17) على قيام المتحكم بضرب إشارة الخطأ في مقدار ثابت K_P يسمى الكسب التناسبي.



شكل (2 -17) نظام تحكم باستخدام المتحكم التناسبي.

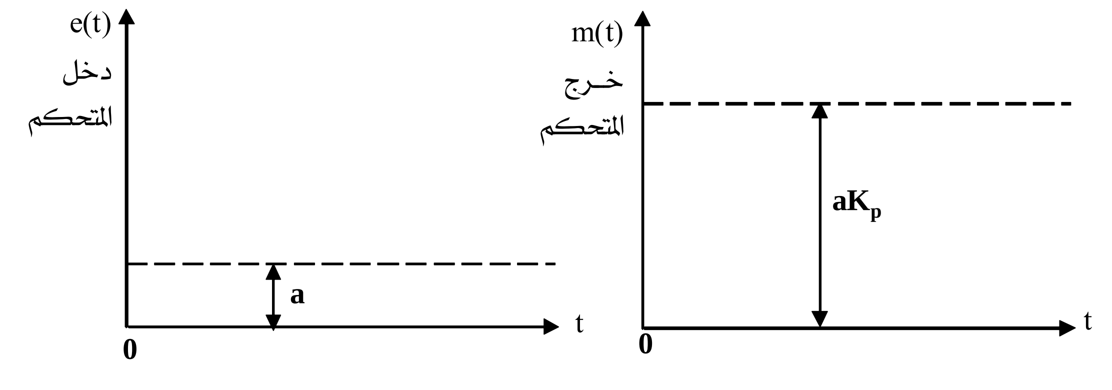
ومن خصائص هذا المتحكم أنه كلما زادت قيمة كسب المتحكم K_P تقل قيمة الخطأ أي أن التناسب بينهما عكسيا. ولكن نجد أن زيادة K_P يمكن أن تسبب زيادة في عدد ترددات خرج النظام أو عدم استقرار النظام. لذا يجب اختيار قيمة K_P لتوائم متطلبات تقليل الخطا (أي زيادة الدقة) ومتطلبات الاستقرار في نفس الوقت. والمعادلات التالية تبين العلاقة بين دخل المتحكم وخرجه كمايلى:

$$m(t) = K_P e(t) \quad (27- \ 2)$$

$$M(s) = K_P E(s) \quad (28- \ 2)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P \quad (29- \ 2)$$

ويبين الشكل (2 -18) العلاقة بين إشارتي الدخل والخرج للمتحكم التاسبي. فإذا كانت قيمة إشارة دخل المتحكم إشارة الخطأ (a) فولت مثلا فإن قيمة إشارة خرج المتحكم هي حاصل ضرب كسب المتحكم K_P في قيمة الخطأ a.



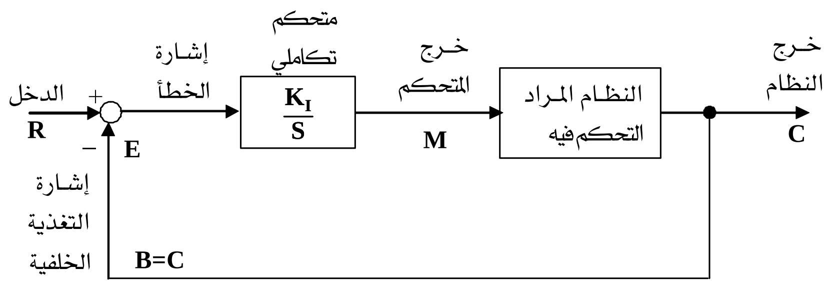
شكل (2 -18) إشارتي دخل وخرج المتحكم التناسبي.

ويتضح من هذا أن عمل المتحكم التناسبي أساسا هو كمكبر وهناك أنواع كثيرة في الحياة العملية لهذا النوع من التحكم منها التي تعمل بالهواء المضغوط والتي تعمل بالزيت أو بالماء المضغوط بالإضافة إلى المكبرات الإلكترونية والمكبرات المغناطيسية والمكبرات الكهربية.

3-4-2. المتحكم التكاملي I-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع على قيام هذا المتحكم بإجراء عملية تكامل لإشارة الخطأ كما هو مبين بالشكل(2 -19) والمعادلات التالية. ويتميز هذا النوع من التحكم بأنه يلاشى الخطأ ويمكن توضيح ذلك من المعادلة الأولى بفرض أن النظام كان في حالة الاستقرار وأن الخرج يساوي الدخل أي أن (R=C) وبذلك تكون إشارة الخطأ تساوى صفر أي أن:

$$E=R-C=0$$



شكل (2 -19) نظام تحكم باستخدام المتحكم التكاملي.

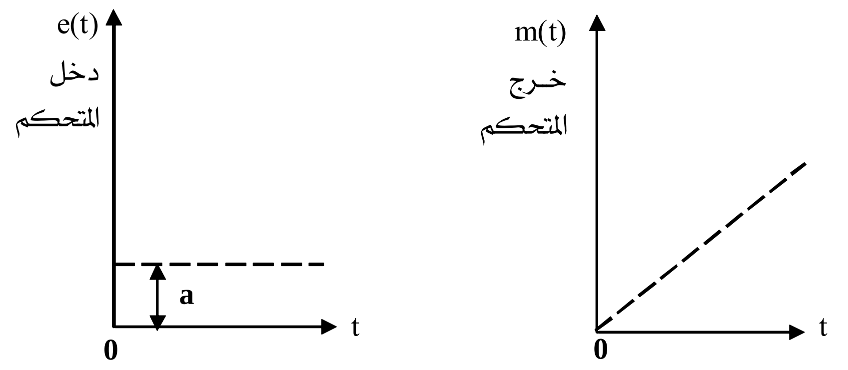
وتكون المعادلات التي توصف ذا النظام كالتالي :

$$m(t) = K_I \int_0^t e(t)dt \qquad (30-\ 2)$$

$$M(s) = K_I \frac{1}{s} E(s)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \qquad (31-\ 2)$$

فإذا حدث نقص مفاجئ في خرج النظام بحيث أصبح الفرق بين الدخل والخرج مقدار ثابتa كما هو مبين في الشكل (2 -20) والذي يوضح العلاقة بين دخل وخرج المتحكم التكاملي في حالة استخدامه للتحكم في نظام ذو دائرة مغلقة أي أن الخطأ يصبح e(t)=a.



شكل (2 -20) إشارتي دخل وخرج المتحكم التكاملي.

فيصبح خرج المتحكم طبقا للمعادلة (2 -30)كالتالي:

$$m(t) = K_I \int_0^t a\,dt$$

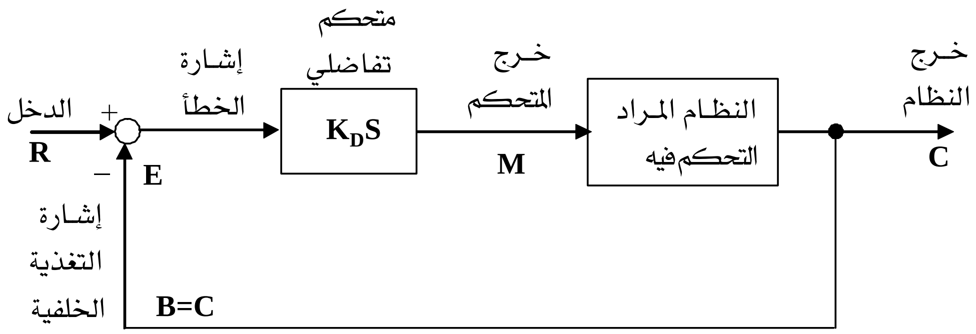
$$m(t) = K_I\, a\, t + C \qquad (32-\ 2)$$

من هذا يتضح أنه بزيادة الزمنt فإن خرج المتحكم m(t) يستمر في التزايد كما هو مبين في الشكل (2 -20) وهذا التزايد يؤثر على النظام المراد التحكم فيه حتى يزداد الخرج ويتساوى مع الدخل وتصبح إشارة الخطأ صفر. وبذلك يلاشى المتحكم التكاملي الخطأ بين الدخل والخرج بتعديل قيمة الخرج حتى تتساوى تماما مع قيمة الدخل . وهذا النوع من التحكم بالرغم من أنه يحقق الدقة المطلوبة ويؤدي إلى تلاشي الخطأ بين الدخل والخرج إلا أنه قد يؤدى إلى عدم استقرار النظام إذا كانت قيمة K_I عالية .

ويسمى الثابت K_I معدل إعادة الضبط reset rate أي المعدل الذي يعمل به المتحكم لإعادة ضبط الخرج C لتتساوى مع قيمة الدخل R. وكلما زادت قيمة هذا المعدل K_I كلما كانت عملية إعادة الضبط أسرع ، ولكن هذا قد يؤدي إلى وجود ترددات كثيرة في الخرج أو عدم الاستقرار لذا يجب اختيار القيمة المناسبة لهذا المعدل K_I. وكما هو الحال في المتحكمات التناسبية فإن المتحكمات التكاملية الصناعية تكون مزودة عادة بوسيلة لضبط K_I لتناسب التطبيق العلمي.

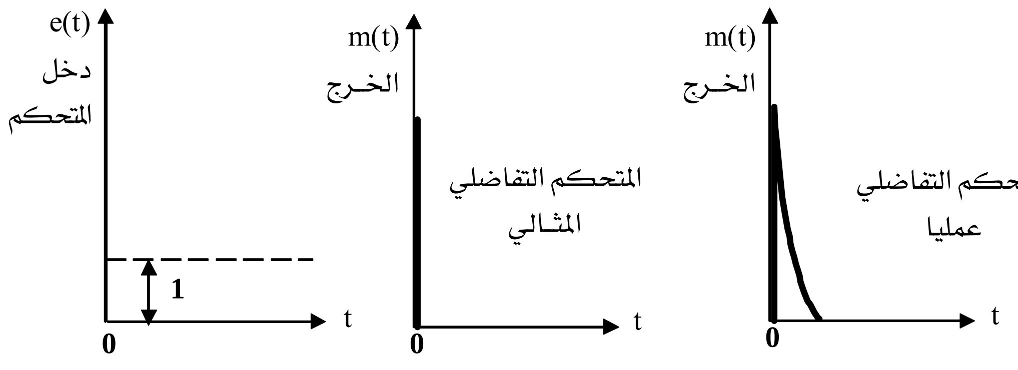
4-4-2. المتحكم التفاضلي D-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع على قيام هذا المتحكم بإجراء عملية تفاضل لإشارة الخطأ كما هو مبين بالشكل (2 -21). والمتحكم التفاضلي يسمى في بعض الأحيان (controller rate) حيث إن المتحكم يعمل على أساس معدل تغير إشارة الخطا بالنسبة للزمن.



شكل (2 -21) نظام تحكم باستخدام المتحكم التفاضلي.

ويلاحظ أن في حالة ثبات قيمة دخل المتحكم التفاضلي (ثابت إشارة الخطأ) فإن خرج المتحكم التفاضلي يساوي صفراً وذلك لأن تفاضل المقدار الثابت يساوي صفراً. ولذا فإن المتحكم التفاضلي لا يستخدم بمفرده في الحياة العملية لأنه يعمل فقط في الحالات العابرة أي أثناء تغير إشارة الخطأ. ويبين شكل (2 -22) العلاقة بين دخل وخرج المتحكم في حالة ما تكون إشارة دخل المتحكم عبارة عن حالة قفزة قدرها الوحدة unit step function.

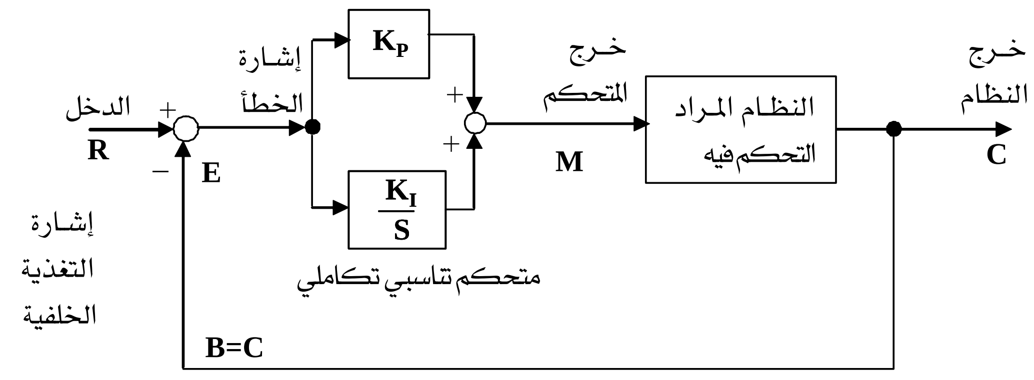


شكل (2 -22) إشارتي دخل وخرج المتحكم التفاضلي نظريا و عمليا.

ومن الملاحظ أن خرج المتحكم التفاضلي يساوي صفر عند ثبات قيمة إشارة الدخل أما في لحظة (t=0) وأثناء تغيير إشارة دخل المتحكم من صفر إلى واحد فإن خرج المتحكم يكون عبارة عن نبضة لها قيمة مرتفعة وسرعان ما تصل إلى الصفر عند ثبات قيمة الدخل هذا من الناحية النظرية (متحكم تفاضلي مثالي). وعمليا فإن خرج المتحكم التفاضلي يأخذ بعض الوقت (زمن قليل جدا) للوصول إلى الصفر. وإذا كانت إشارة دخل المتحكم التفاضلي عبارة عن حالة انحدار x(t)=0 فإن خرج المتحكم في هذه الحالة يساوي مقدار ثابت. والعيب الرئيس في المتحكم التفاضلي أنه يكبر إشارة الضوضاء فإذا كانت إشارة دخل المتحكم التفاضلي محملة ببعض الضوضاء فإن المتحكم سوف يكبر هذه الضوضاء وهذا قد يؤدى الى مشاكل من الناحية العملية حيث أن معظم الإشارات في التطبيقات العملية تكون محملة بنسبة من الضوضاء.

5-4-2. المتحكم التناسبي التكاملي PI-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع على كل من فعل المتحكم التناسبي بالإضافة إلى فعل المتحكم التكاملي أي أنه يقوم بضرب إشارة الخطأ في رقم ثابت K_P بالإضافة إلى تكاملها كما هو موضح في المخطط الصندوقي المبين في الشكل (2 -23) للمتحكم التناسبي التكاملي فإن المقدار الثابت K_P هو كسب الجزء التناسبي من المتحكم أما K_I فهو كسب الجزء التكاملي. وبعض الشركات الصناعية تستخدم معامل آخر للجزء التكاملي من المتحكم هو $T_I = \frac{1}{K_I}$ وفى هذه الحالة يتم تمثيل الجزء التكاملي بالمقدار ($\frac{1}{T_I s}$). والمتحكمات الصناعية من هذا النوع تزود عادة بوسيلة لضبط كل من K_P, K_I, or T_I للتمكن من اختيار القيم المناسبة حسب الاستخدامات والتطبيقات في الحياة العملية.



شكل (2 -23) نظام تحكم باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي.

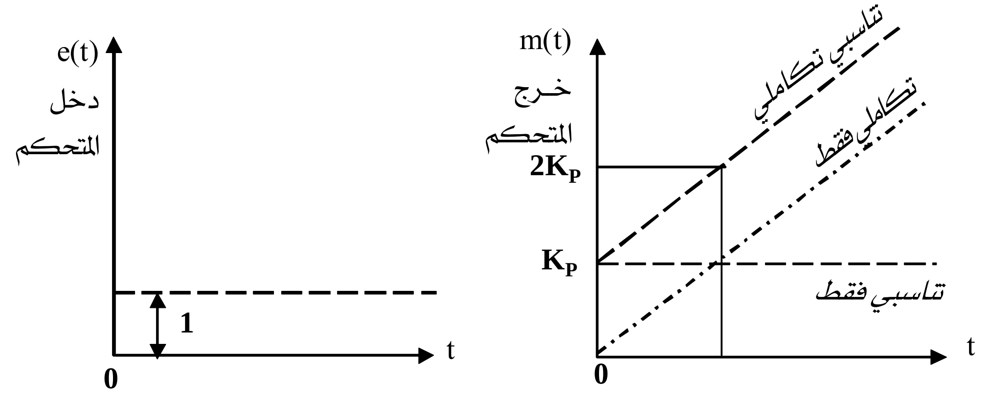
ويتضح العمل الأساسي لهذا النوع من المتحكمات من المعادلات الآتية:

$$m(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt \quad (2-23)$$

$$M(s) = K_P E(s) + \frac{K_I}{s} E(s) = (K_P + \frac{K_I}{s})E(s)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (2-24)$$

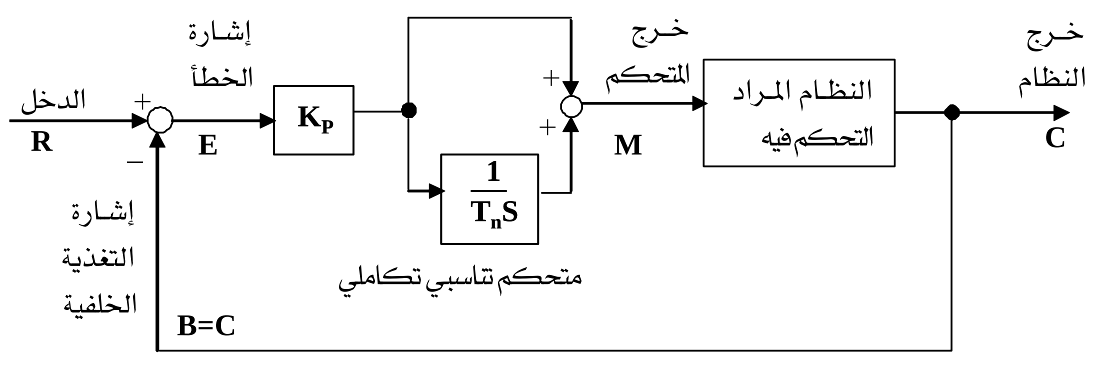
ويبين شكل (2 -24) العلاقة بين دخل وخرج المتحكم. فإذا كانت قيمة إشارة الخطأ تساوي 1. فإن الخرج يكون كما هو موضح بالشكل. أما إذا كان المتحكم التناسبي فقط يكون خرج المتحكم قيمة ثابتة K_P لآ كما موضح بالخط الأفقي. أما في حالة المتحكم التناسبي التكاملي تتزايد قيمة خرج المتحكم كما موضح بالخط المائل العلوي.



شكل (2 -24) إشارتي دخل وخرج المتحكم التناسبي التكاملي.

ويلاحظ أن الطريقة التى تم توصيل المتحكم التناسبي التكاملي بها في شكل (2 -23) تسمى طريقة تركيب التوازى.

ويوجد طريقة أخرى أكثر شيوعا لتوصيل المتحكم التناسبي التكاملي في الحياة العملية تسمى طريقة تركيب التوالي كما هو مبين بالشكل (2 -25).



شكل (2 -25) التركيب التوالي للمتحكم التناسبي التكاملي.

وبإعادة كتابة المعادلة (2 -34) السابقة بعد ضرب الجزء التكاملي في ($\frac{K_P}{K_P}$) وتصبح المعادلة:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s}\frac{K_P}{K_P}$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P(1 + \frac{K_I}{K_P s})$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P(1 + \frac{1}{\frac{K_P}{K_I}s})$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P(1 + \frac{1}{T_n s}) \quad (35\text{-}\ 2)$$

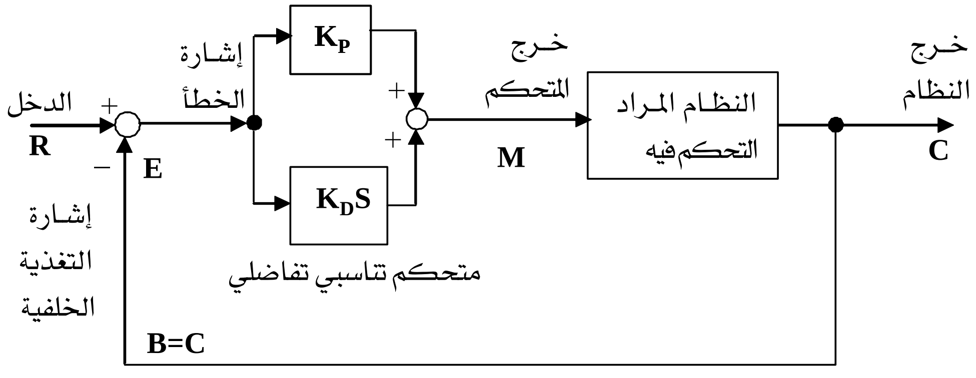
حيت إن:

$$T_n = \frac{K_P}{K_I} = K_P T_I$$

وتزود هذه المتحكمات أيضا في الحياة العملية بوسيلة لضبط قيم كل من K_P, T_n ويتضح من شكل (7 -8) أن تغيير K_P يؤثر على الجزء التناسبي والجزء التكاملي في نفس الوقت أما تغيير T_n فيؤثر على الجزء التكاملي فقط.

6-4-2. المتحكم التناسبي التفاضلي PD-Controller

وتعتمد نظرية عمله على كل من فعل المتحكم التناسبي وفعل المتحكم التفاضلي أي أنه يقوم بضرب إشارة الخطأ في رقم ثابت K_P بالإضافة إلى تفاضلها كما هو مبين بالشكل (2 - 26).



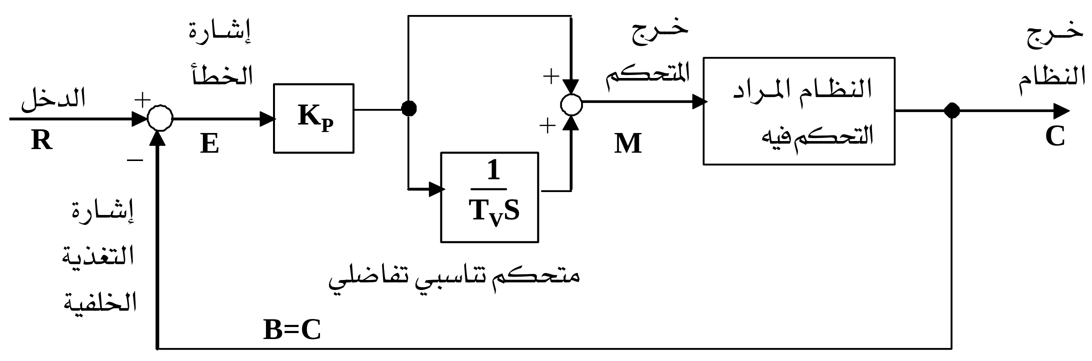
شكل (2 -26) نظام تحكم باستخدام المتحكم التناسبي التفاضلي.

ويتضح العمل الأساسي لهذا المتحكم من المعادلات الآتية:

$$m(t) = K_P e(t) + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (36-\ 2)$$

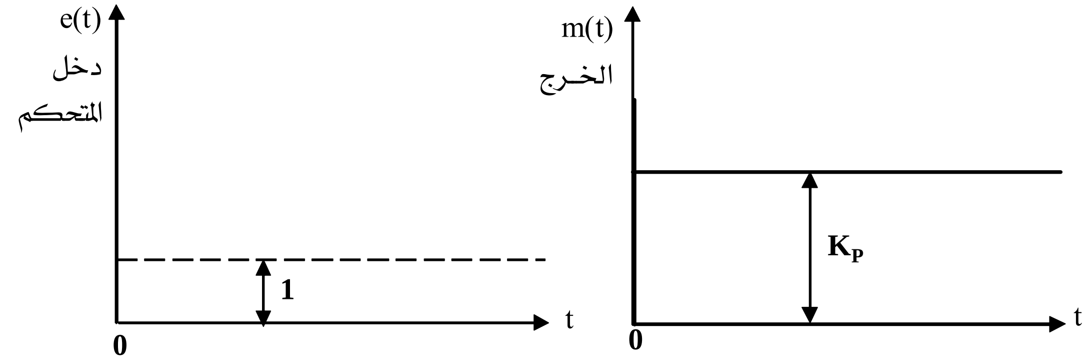
$$M(s) = K_P E(S) + K_D SE(s)$$
$$\frac{M(s)}{E(S)} = K_P + K_D S \quad (37-\ 2)$$

ويبين شكل (2 -27) المتحكم التناسبي التفاضلي في حالة التركيب التوالي. ويسمى T_v زمن التفاضلي. وفى الحياة العملية فانه يمكن ضبط قيم كل من K_P, T_v.



شكل (2 -27) التركيب التوالي للمتحكم التناسبي التفاضلي.

وبدراسة الشكل (2 -28) الذي يوضح إشارات الدخل والخرج للمتحكم التناسبي التفاضلي نجد أنه عندما تكون إشارة دخل المتحكم (إشارة الخطأ) عبارة عن حالة قفزة قدرها الوحدة نجد أن التأثير السائد هو فعل المتحكم التناسبي أما المتحكم التفاضلي فإن تأثيره يظهر فقط في البداية عند (t=0) أي أثناء تغير إشارات الدخل للمتحكم.



شكل (2 -28) إشارتي دخل وخرج المتحكم التناسبي التفاضلي.
(الدخل دالة القفزة)

أما إذا كانت إشارات دخل المتحكم التناسبي التفاضلي عبارة عن دالة انحدار قدرها الواحد فإن إشارة الخرج تكون:

$$m(t) = K_P t + K_D \frac{dt}{dt}$$

$$m(t) = K_P t + K_D \quad (38- \ 2)$$

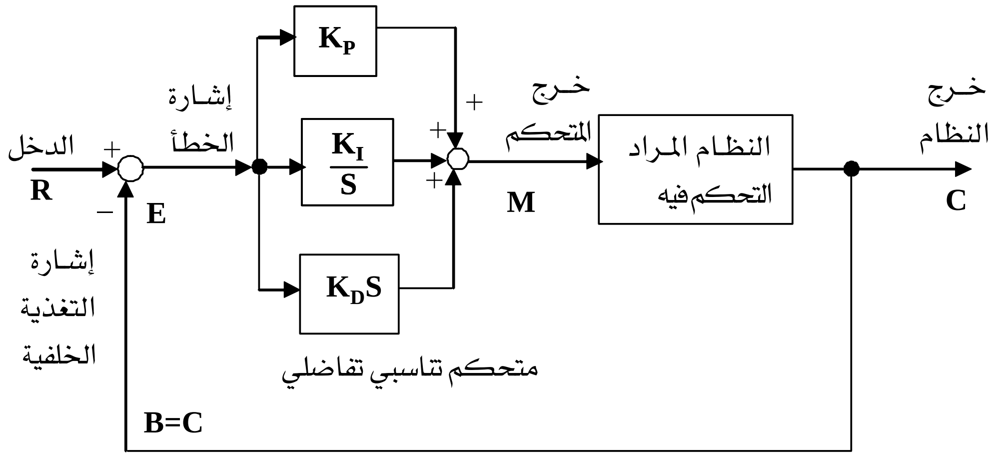
وعلى ذلك تكون إشارات دخل وخرج المتحكم كما مبين في الشكل(2 -28) ويلاحظ أن فعل المتحكم التفاضلي يسبق فعل المتحكم التناسبي بالفترة الزمنية التي تسمى زمن التفاضل T_v .

2-4-7. المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع على كل من فعل المتحكم التناسبي والمتحكم التكاملي والمتحكم التفاضلي وهذا النوع يجمع مزايا الثلاثة أنواع كما هو مبين بالشكل (2 -29). ويتضح أساس عمله من المعادلة (2.39) التالية:

$$m(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (39- \ 2)$$

حيث إن ((m(t)) هي إشارة الخرج لمتحكم ، (e(t)) هي إشارة دخل المتحكم (إشارة الخطأ).

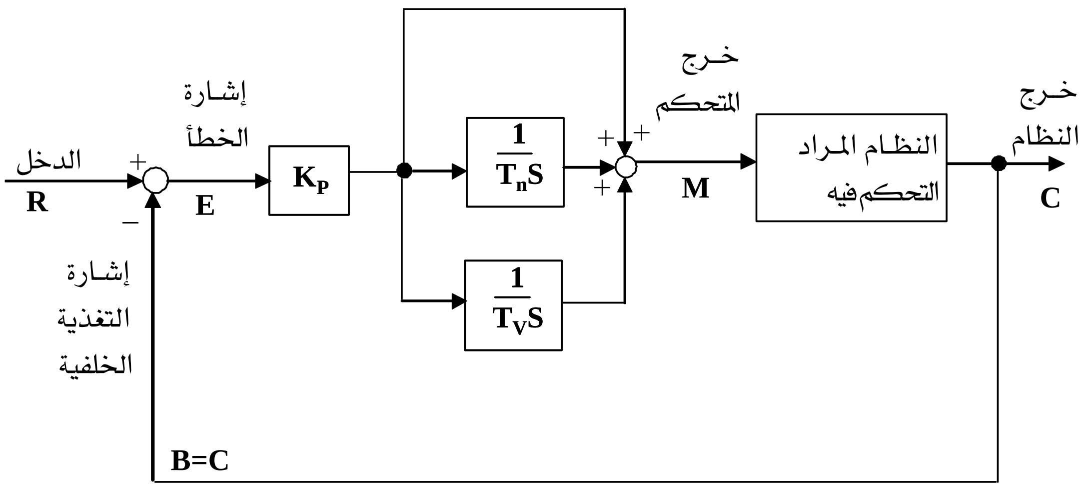


شكل (2 -29) نظام تحكم باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي.

ويلاحظ أن K_P هو كسب المتحكم التناسبي و K_I هو كسب المتحكم التكاملي و K_D هو كسب المتحكم التفاضلي ولإيجاد دالة التحويل لهذا المتحكم نجرى التحويل اللابلاسي للمعادلة السابقة (2 -39) مع فرض أن جميع القيم الابتدائية تساوى الصفر فينتج أن:

$$\frac{M(s)}{E(S)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D S \quad (2\text{-}40)$$

ويبين شكل (2 -30) المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي في حالة التركيب التوالى والأكثر شيوعا في الحياة العملية.



شكل (2 -30) التركيب التوالي للمتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي.

وبإعادة كتابة المعادلة (2 -40) السابقة بد ضرب الحد الثانى والثالث للطرف الأيمن في ($\frac{K_P}{K_P}$) ونختصر المعادلة ينتج التالي:

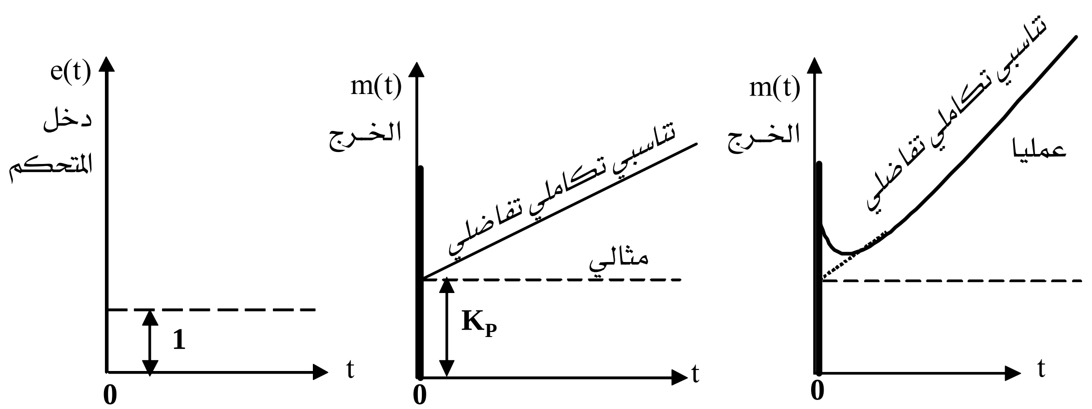
$$\frac{M(s)}{E(S)} = K_P + \frac{K_I}{s}\frac{K_P}{K_P} + K_D S \frac{K_P}{K_P}$$

$$\frac{M(s)}{E(S)} = K_P (1 + \frac{1}{T_n s} + T_v S \quad (41- \ 2)$$

حيث إن:

$$T_I = \frac{1}{K_I}, \quad T_n = T_I K_P, \quad T_v = \frac{K_D}{K_P}$$

وفى الحياة العملية تزود المتحكمات بوسيلة لضبط كل من K_P, T_v, T_n ويلاحظ أن قيم K_P في هذا النوع من التركيب (تركيب التوالي) تؤثر على كل من المتحكم التناسبي والمتحكم التكاملي والمتحكم التفاضلي. أما قيمة T_n فإنها تؤثر فقط عنى المتحكم التكاملي وقيمة T_v تؤثر فقط على المتحكم التفاضلي. ويبين الشكل (2 -31) إشارات الدخل والخرج للمتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي في حالة ما تكون إشارة الدخل عبارة عن دالة قفزة قيمتها الوحدة.



شكل (2 -31) إشارتي دخل وخرج المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي.
(نظريا وعمليا)

وعلى ذلك فإن هذا النوع من المتحكمات يعتبر من اكثر المتحكمات استخداما نظرا لجمعه لمزايا الثلاثة أنواع السابقة حيث أنه يعطى آداء اكثر استقرارا.

تمارين

1 - أوجد قيم الأقطاب والأصفار Poles and zeros للدوال التالية مع رسم هذه القيم على المستوى المركب s-plane:

(a) $G(s)=\dfrac{10(s+2)}{s^2(s+1)(s+10)}$ (b) $G(s)=\dfrac{10s(s+1)}{(s+2)(s^2+3s+2)}$

(c) $G(s)=\dfrac{10(s+2)}{s(s^2+2s+2)}$ (d) $G(s)=\dfrac{e^{-2t}}{10s(s+1)(s+2)}$

2 - أوجد التحويل اللابلاسي للدوال التالية:

(a) $g(t)=5te^{-5t}u(t)$ (b) $g(t)=(t\sin 2t+e^{-2t})u(t)$

(c) $g(t)=2e^{-2t}\sin 2t u(t)$ (d) $g(t)=\sin 2t\cos 2t u(t)$

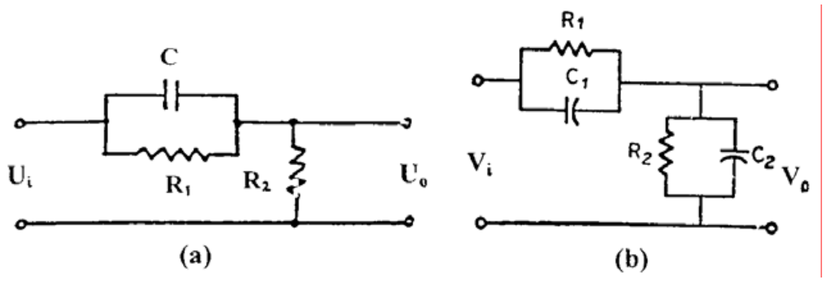
3 - أوجد تحويل لابلاس العكسي للدوال التالية:

(a) $G(s)=\dfrac{1}{s\ (s+2)(s+3)}$ (b) $G(s)=\dfrac{10}{(s+1)^2(s+3)}$

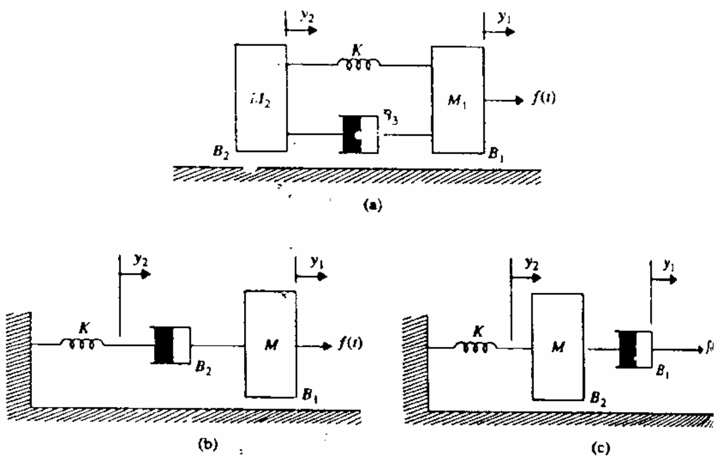
(c) $G(s)=\dfrac{100(s+2)}{s(s^2+4)(s+1)}$ (d) $G(s)=\dfrac{2(s+1)}{s(s^2+S+2)}$

(e) $G(s)=\dfrac{1}{(s+1)^3}$ (f) $G(s)=\dfrac{2(s^2+s+1)}{s(s+1.5)(s^2+5s+5)}$

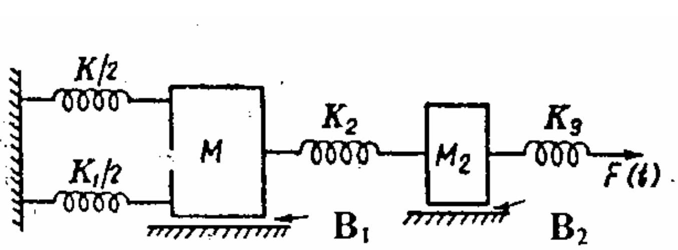
4 - أوجد دالة التحويل T.F للدوائر الكهربائية المبينة بالأشكال التالية عن طريق كتابة المعادلات التفاضلية ثم بطريقة المعاوقات المركبة ثم اختصرها إلى أبسط صورة.



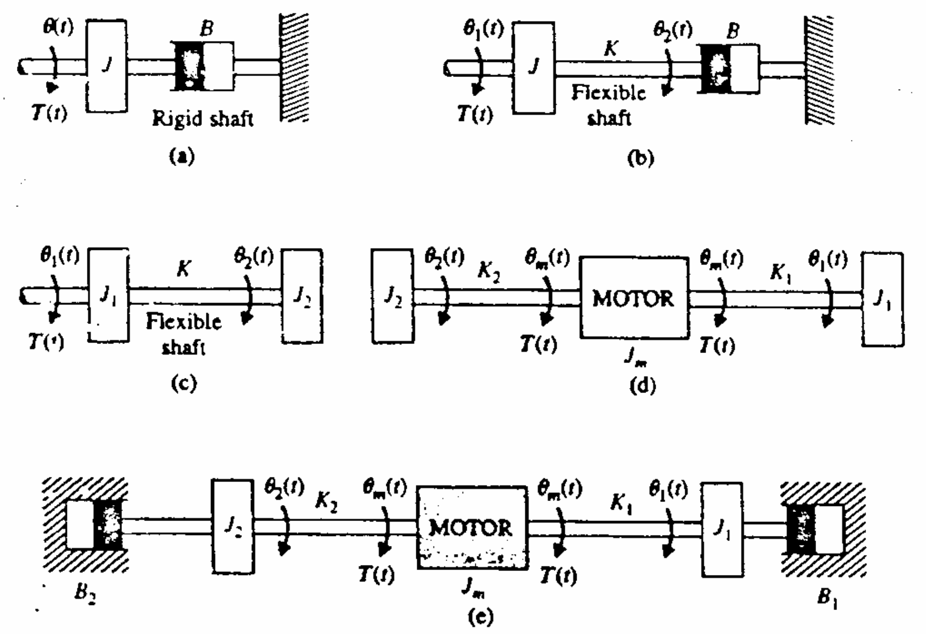
5 - ارسم الشبكة الميكانيكية mechanical network واكتب معادلات القوة للانظمة الميكانيكية الانتقالية المبينة بالشكل التالي مع رسم المخطط الصندوقي وحساب دالة التحويل لكل منهم.



6 - اكتب المعادلات التفاضلية للنظام الميكانيكي المبين بالشكل بعد رسم الشبكة الميكانيكية.



7 - ارسم التمثيل الميكانيكي واكتب معادلات القوة للانظمة الميكانيكية الدورانية الآتية. وكذلك ارسم المخطط الصندوقي وأحسب دالة التحويل لكل منهم.



8 - يتكون المتحكم التناسبي التكاملي من جزئين متحكم تناسبي بالإضافة إلى متحكم تكاملي.

ا - اشرح فكرة عمل هذا المتحكم مع ذكر مميزاته وعيوبه إن وجدت.

ب - اكتب المعادلات التفاضلية التي توصف هذا المتحكم مع توضيح المخطط الصنوقي لهذا المتحكم.

ج - اشرح مع الرسم العلاقة بين دخل وخرج المتحكم في حالة ما يكون الدخل دالة القفزة قدرها الوحدة.

9 - يتكون المتحكم التناسبي التفاضلي من جزئين متحكم تناسبي بالإضافة إلى متحكم تفاضلي.

أ - اشرح فكرة عمل هذا المتحكم مع ذكر مميزاته وعيوبه إن وجدت.

ب - اكتب المعادلات التفاضلية التي توصف هذا المتحكم مع توضيح المخطط الصنوقي لهذا المتحكم.

ج - اشرح مع الرسم العلاقة بين دخل وخرج المتحكم في حالة ما يكون الدخل دالة القفزة قدرها الوحدة.

10 - يتكون المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي من ثلاثة أجزاء متحكم تناسبي بالإضافة إلى متحكم تكاملي وكذلك متحكم تفاضلي.

ا - اشرح فكرة عمل هذا المتحكم مع ذكر مميزاته وعيوبه إن وجدت.

ب - اكتب المعادلات التفاضلية التى توصف هذا المتحكم مع توضيح المخطط الصنوقى لهذا المتحكم.

ج - اشرح مع الرسم العلاقة بين دخل وخرج المتحكم في حالة ما يكون الدخل دالة القفزة قدرها الوحدة.

المملكـــة العربيـــة الســـعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تقنية التحكم الآلي

تحليل منظومة التحكم

تحليل منظومة التحكم

3

الوحدة الثالثة : تحليل منظومة التحكم

3 -1. دالة التحويل

3 -2. التحليل الزمني لأنظمة التحكم

3 -2 -1. إشارات الدخل النموذجية

3 -2 -2. تصنيف أنظمة التحكم

3 -2 -3. خطأ حالة الاستقرار

3 -2 -4. الاستجابة العابرة

3 -2 -5. الاستجابة العابرة للأنظمة ذات الرتبة الثانية

3 -2 -6. منحنى الخواص لأنظمة التحكم

تمارين

الأهداف :

بعد انتهائك من دراسة هذه الوحدة تكون قادرا على:

- معرفة إيجاد دالة التحويل للنظم
- معرفة التحليل الزمني لأنظمة التحكم
- التعرف على إشارات الدخل النموذجية
- التعرف على أصناف نظم التحكم
- التعرف على إيجاد الخطأ
- تعريف الاستجابة الدائمة والعابرة لنظم الرتبة الأولى والثانية
- التعرف على منحنى الخواص لأنظمة التحكم

1-3. دالة التحويل Transfer Function

تعتمد نظرية التحكم في الأنظمة على تواجد دالة تستخدم لتحديد العلاقة بين دخل وخرج النظام والتي تسمى دالة التحويلtransfer function. وعلى ذلك فإن دالة التحويل تعرف بأنها النسبة بين التحويل اللابلاسي للخرج إلى التحويل اللابلاسي للدخل في حالة ما تكون جميع القيم الابتدائية initial conditions مساوية للصفر. وبدراسة نظام يتغير خطيا مع الزمن والمعروف بالمعادلة التفاضلية الآتية:

$$a_o y^{(m)} + a_1 y^{(m-1)} + \ldots + \mathrm{a}_{\text{n-1}} y + a_n y = b_o \overset{(m)}{x} + b_1 \overset{(m-1)}{x} + \ldots + b_{m-1} x + b_m x \ \ (\mathrm{n} \geq \mathrm{m}) \qquad (1-\ 3)$$

حيث إن:

خرج النظام y= output of the system

دخل النظام x=input of the system

وبأخذ التحويل اللابلاسي لكل من جانبي المعادلة (4 -1) وبفرض أن جميع القيم الابتدائية مساوية للصفر فأن:

$$\text{Transfer Function} = \mathrm{G(s)} = \frac{\mathrm{Y(s)}}{\mathrm{X(s)}} = \frac{b_o\ s^m b_1 s^{m-1} + \ldots + b_{m-1} s + b_m}{a_o\ s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots . + a_{n-1} s + a_n} \qquad (2-\ 3)$$

ويمكن تعريف دالة التحويل بالعلاقة بين تحويل لابلاس لخرج النظام ودخله وهي معرفة كالآتي:

$$\text{دالة التحويل} = \frac{\text{تحويل لابلاس الخرج}}{\text{تحويل لابلاس الدخل}}$$

مثال (3 -1):

أوجد دالة نقل النظام الذي يمثله النموذج الرياضي الآتي:

(y'(t)+y(t)=2x(t0.1

الخطوة الأولى:

قم بتحويل لابلاس لطرفي معادلة النظام لتصبح المعادلة كالآتي

(sY(s)+Y(s)=2X(s0.1

الخطوة الثانية:

خذ Y(s) كعامل مشترك في الطرف الأيسر من المعادلة ليصبح كالآتي

(s+1)Y(s)=2X(s0.1)

الخطوة الثالثة:

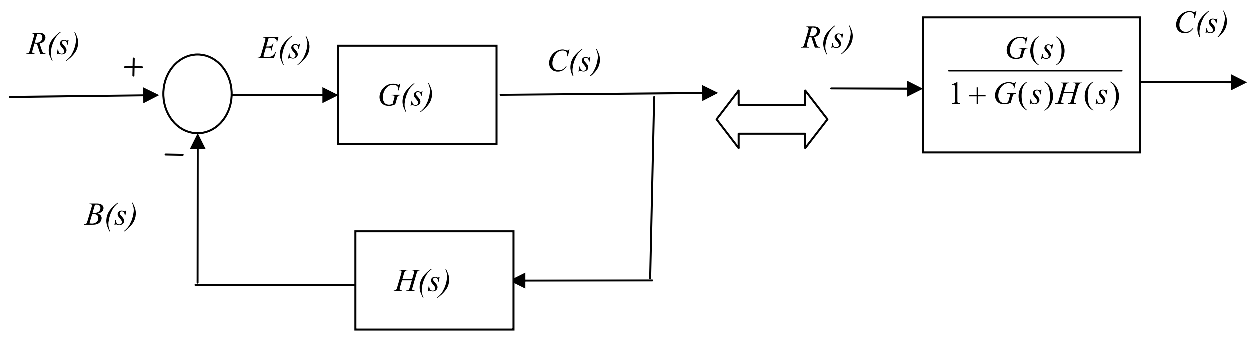
اقسم تحويل لابلاس الخرج على تحويل لابلاس الدخل لتحصل على دالة نقل النظام كالآتي**:**

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{2}{0.1s+1}$$

دالة تحويل حلقة تغذية خلفية نموذجية

يوضح الشكل(3 -1)(أ) مخطط صندوقي لحلقة تغذية خلفية نموذجية.

للحصول على دالة التحويل لحلقة تغذية خلفية نموذجية نتبع الخطوات الآتية.



(ب)

(أ)

الشكل(3 -1) حلقة تغذية خلفية نموذجية

من الشكل(3 -1)(أ) نكتب المعادلات الآتية

$$E(s)=R(s)-B(s)$$

علما أن

$$B(s)=C(s)H(s)$$

ومن ثم

$$E(s)=R(s)-C(S)H(s)$$

وحيث إن

$$C(s)=E(s)G(s)$$

نحصل على

$$C(s)=[R(s)-C(s)H(s)]G(s)$$

بإعادة ترتيب المعادلة السابقة نحصل على

$$C(s)[(1+G(s)H(s)]=R(s)G(s)$$

ومن ثم نحصل على دالة نقل الحلقة المغلقة كالآتي

$$T(s)\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$

وذالك ما تم تمثيله من خلال الشكل 1 -10 (ب) المكافئ للحلقة المغلقة في حالة التغذية الأحادية (unity feedback)

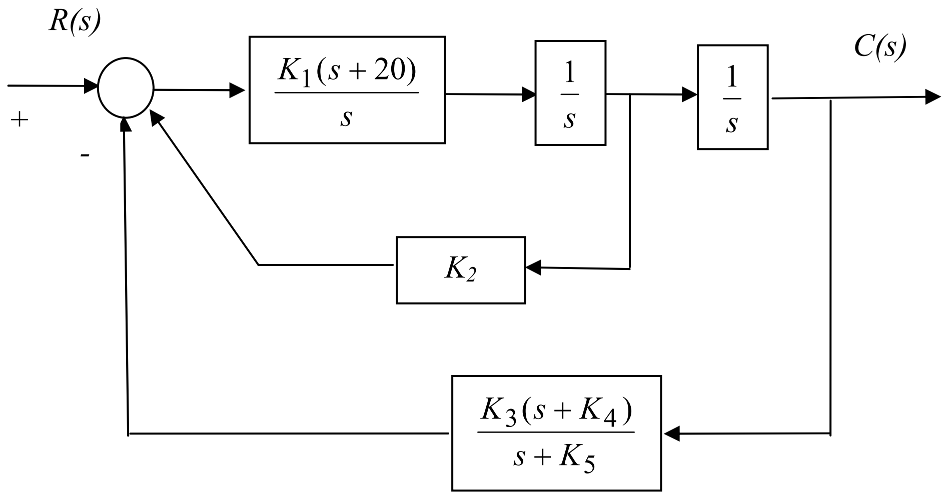
$$H(s)=1$$

فإن دالة نقل الحلقة المغلقة تصبح كالآتي:

$$T(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)}$$

مثال (3 -2):

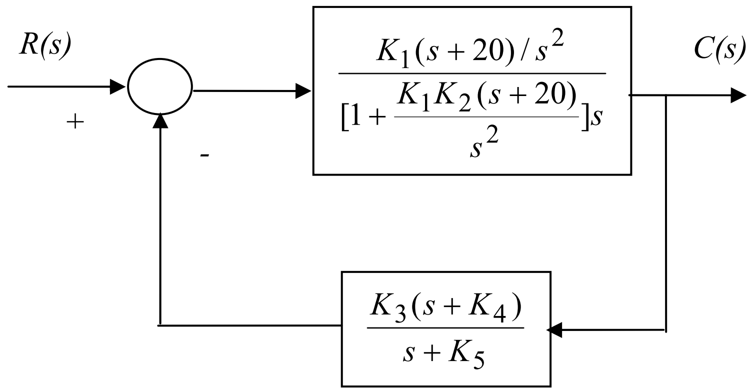
أوجد دالة التحويل للمخطط الصندوقي الموضح في الشكل(3 -2) مستخدما طرق التبسيط السابقة



الشكل(3 -2) المخطط الصندوقي لنظام المثال(3 -2)

الحل:

1. ابدأ بتحويل وصلة التجميع إلى وصلتي تجميع على التوالي، ثم ادمج دالتي التحويل $\frac{K_1(s+20)}{s}$ و $\frac{1}{s}$ في صندوق واحد.
2. استبدل الحلقة المغلقة الداخلية بصندوق واحد مستخدما قانون التغذية الخلفية ثم قم بإدماج الناتج مع دالة التحويل $\frac{1}{s}$ كونها توالي معه.
3. من الخطو الأولى والثانية نحصل على الحلقة المغلقة المبسطة المبينة في الشكل(3 -3)



الشكل(3 -3) المخطط الصندوقي المبسط لمثال(3 -2)

4. من الشكل(3 -3) نحصل عل دالة نقل النظام الإجمالي T(s)

$$T(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{K_1(s+20)(s+k_5)}{s[(s^2+K_1K_2(s+20)][s+K_5]+K_1K_3(s+20)(s+K_4)}$$

3-2. التحليل الزمني لأنظمة التحكم Time Domain Analysis of Control Systems

في أنظمة التحكم والتي تكون دوال في الزمن فإن دراسة الاستجابة الزمنية تكون عاملاً مهماً في تحليل وتصميم الأنظمة. وتتكون الاستجابة الزمنية للنظام من جزئين أولهما الاستجابة العبارة transient response والآخر استجابة مستقرة الحالة steady state response ويعبر عنها بخرج النظام كاتالى:

$$C(t)=C_t(t)+C_{ss}(t)$$

حيث إن:

الاستجابة العابرة $C_t(t)$ = transient response

الاستجابة المستقرة $C_{ss}(t)$ = steady state response

ويتكون حل معادلة النظام بالنسبة لدخل وخرج النظام بدلالة الزمن من جزئين يمثلان بالاستجابة العابرة والمستقرة للنظام. والفرق بين الاستجابة المستقرة الحالة والدخل المقارن Reference input يعرف بالخطأ المستقر steady state error.

1-2-3. الإشارات الدخل النموذجية Typical Input Signals

إن إشارات الدخل لأنظمة التحكم غالبا تكون غير معروفة مسبقا وفى تحليل ودراسة أنظمة التحكم لابد من توافر قاعدة معروفة لمقارنة خصائص أنظمة التحكم المختلفة. وتعتمد هذه القاعدة على اختيار إشارات اختبار معينة (إشارات دخل). هذه الإشارات يتم مقارنة استجابة الأنظمة المختلفة لها عند إدخالها للأنظمة. ومن أهم الدوال شائعة الاستخدام دالة الخطوة step ودالة الانحدار ramp ودالة العجلة acceleration وكذلك دالة الدفعة impulse وغيرها من الدوال. وكما ذكرنا عن بعض هذه الدوال في الفصل الثاني فسوف ندرسها هنا بطريقة مشابهة نظرا لأهميتها في دراسة الاستجابة الزمنية لأنظمة التحكم.

أ - الدخل كدالة الخطوة Step Function Input

كما هو مبين بالشكل (5 -1أ) فإن قيمة r(t) تبقى صفر عند $t\langle 0$ ثم تزداد لحظيا من الصفر إلى R عند $t\rangle 0$ ويمكن التعبير عنها كالتالي:

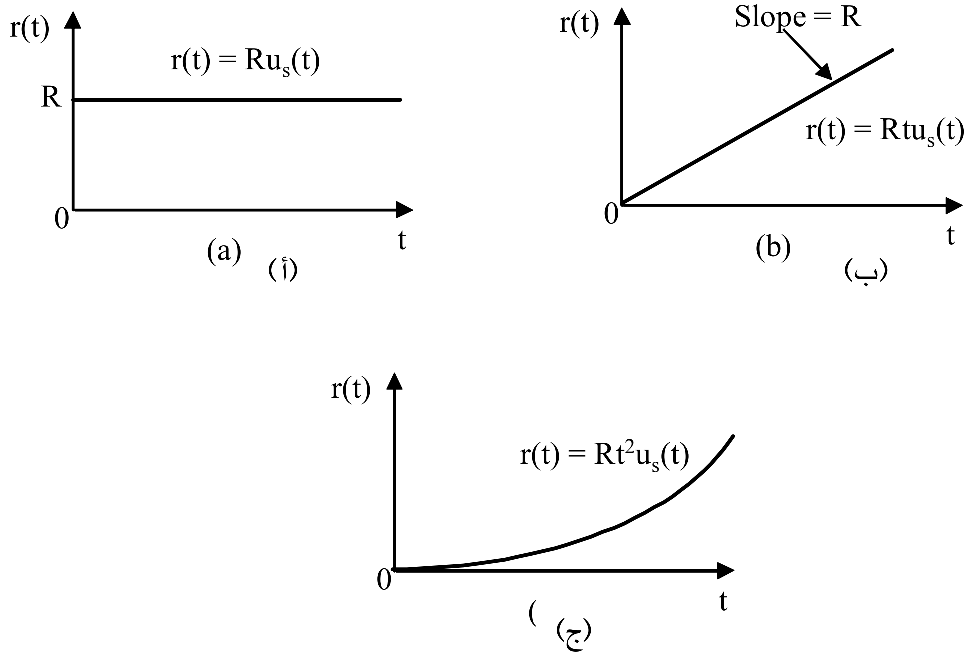
$$r(t) = 0 \quad t\langle 0$$
$$r(t) = R \quad t\rangle 0 \qquad (3- 3)$$

Or, $$r(t) = Ru_s(t) \qquad (4- 3)$$

حيث Yن:

ثابت حقيقي R=real constant

دالة خطوة تيمتها الوحدة $u_s(t)$ = the unit step function



الشكل(3 -4) دوال الخطوة والانحدار والعجلة.

ب -الدخل كدالة انحدار Ramp Function Input

كما هو مبين بالشكل(3 -5)ب فإن قيمة r(t) تبقى صفر عند $t\langle 0$ ثم تزداد خطيا مع زيادة الزمن عند $t\rangle 0$. ويمكن التعبير عنها كالتالي:

$$r(t) = 0 \qquad t\langle 0$$

Or, $$r(t) = Rt \qquad t\rangle 0 \qquad (5-\ 3)$$

$$r(t) = Rt\,u_s(t) \qquad (6-\ 3)$$

ج -الدخل كدالة العجلة Acceleration Function Input

. كما هو مبين بالشكل (3 -4)ج فإن قيمة r(t تبقى صفر عند $t\langle 0$ ثم تكون دالة تربيعية عند $t\rangle 0$. ويمكن التعبير عنها كالتالي:

$$r(t) = 0 \qquad t\langle 0$$

Or, $$r(t) = Rt^2 \qquad t\rangle 0 \qquad (7-\ 3)$$

$$r(t) = (\frac{1}{2})Rt^2u_s(t) \qquad (8-\ 3)$$

2-2-3. تصنيف أنظمة التحكم Classification of Control Systems

أ - رتبة النظام Order of System

تعرف رتبة النظام بأنها أعلى درجة للمتغير S في مقام دالة التحويل الكلية. معادلة المقام هذه تسمى معادلة الخواص Characteristic equation وعندما يكون البسط والمقام لدالة التحويل كثيرة الحدود في s وفيما يلي سوف نستعرض الخطوات اللازمة لحساب رتبة النظام :

1 - يتم كتابة المعادلات التى تربط دخل وخرج النظام.
2 - يتم إجراء التحويل اللابلاسd للمعادلة مع فرض أن القيم الابتدائية تساوى الصفر.
3 - يتم حساب دالة التحويل للنظام وتحويلها الى دالة كثيرة الحدود في s.
4 - أعلى درجة للمتغير s في مقام دالة التحويل يدل على رتبة النظام.

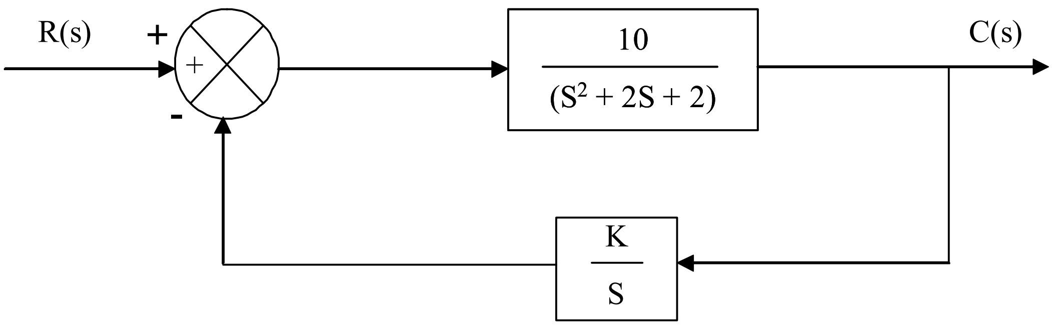
ب - نوع النظام Type of System

طريقة أخرى لتصنيف أنظمة التحكم هى تقسيمها طبقا لنوع النظام ولتحديد نوع النظام نتبع الخطوات التالية:

1 - يتم تحديد دالة التحويل الامامية G(s) وكذلك دالة التحويل الخلفية H(s) للنظام.
2 - يتم حساب دالة التحويل GH(s) للدائرة المفتوحة.
3 - يتم ترتيب مقام دالة التحويل GH(s) تنازليا لدرجة المتغير S.
4 - أعلى درجة للمتغير S في المقام تدل على نوع النظام.

مثال(3 -3):

احسب الرتبة والنوع لنظام التحكم المبين في الشكل(3 -5)



الشكل(3 -5) مخطط صندوقي لنظام تحكم.

الحل:

دالة التحويل الكلية لهذا النظام تكون كالتالي:

$$G(s) = \frac{10s}{s(s^2 + 2s + 2) + 10K}$$
$$= \frac{10s}{s^3 + 2s^2 + 2s + 10K}$$

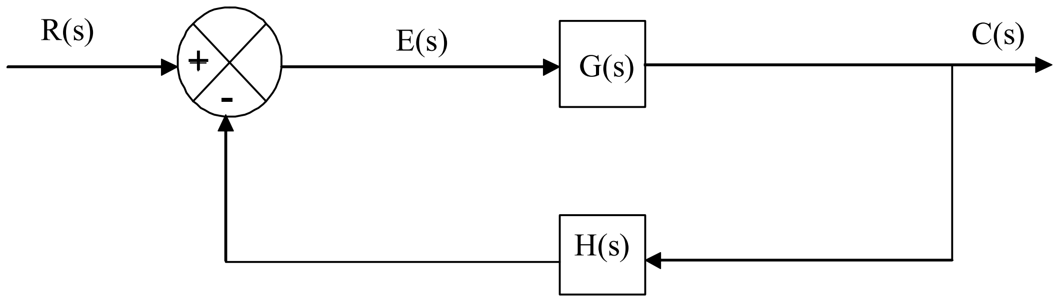
وبالنظر إلى أعلى رتبة للمتغير S في المقام نجد أنه 3 ولذلك يكون هذا النظام من الرتبة الثالثة. أما دالة التحويل للدائرة المفتوحة لهذا النظام فتكون كالتالي:

$$G(s)H(s) = \frac{10K}{s(s^2 + 2s + 2)}$$
$$= \frac{10K}{s(s + 1 + j)(s + 1 - j)}$$

وبالنظر إلى أعلى درجة في المقام نجد أنه 1 ولذلك يكون هذا النظام من النوع (1).

3-2-3. خطأ حالة الاستقرار Steady State Error

بدراسة نظام التحكم المبين بالشكل (3- 5) نجد أن دالة التحويل الكلية تكون كالتالي:



الشكل(3 -6) نظام تحكم.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

وبدراسة المخطط الصندوقي لهذا النظام نجد أن إشارة الخطأ هي:

$$E(s) = R(s) - C(s)$$
$$E(s) = R(s) - E(s)G(s)H(s)$$
$$E(s) + E(s)G(s)H(s) = R(s)$$
$$E(s)(1 + G(s)H(s)) = R(s)$$

فتكون دالة التحويل بين إشارة الخطأ $E(s)$ وإشارة الدخل $R(s)$ كتالي:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = 1 - \frac{G(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}$$

حيث إن إشارة الخطا $E(s)$ هي الفرق بين إشارة الدخل وإشارة التغذية الخلفية وعلى ذلك فإن :

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} R(s)$$

أي أن خطأ حالة الاستقرار الفعلي هو:

$$e_{ss} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} E(s) = \lim_{s\to 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (9-\ 3)$$

أ - خطأ حالة الاستقرار في حالة دخل دالة الخطوة Steady State Error for Step Input

بتطبيق المعادلة (3 -9) مع دخل دالة خطوة قيمتها الوحدة فإن خطأ حالة الاستقرار يكون كالتالى:

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} \frac{s}{1+G(s)H(s)} \frac{1}{s}$$
$$= \frac{1}{1+G(0)H(0)}$$

فيكون K_P معامل خطأ الوضع Position eror constant وخطأ حالة الاستقرار كالتالي:

$$K_P = \lim_{s\to 0} G(s)H(s) = G(0)H(0)$$
$$e_{ss} = \frac{1}{1+K_P}$$

ب - خطأ حالة الاستقرار في حالة دخل دالة الانحدار Steady State Error for Ramp Input

بتطبيق المعادلة (3 -9) مع دخل دالة الانحدار قيمتها الواحد فإن خطأ حالة الاستقرار يكون كالتالى:

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} \frac{s}{1+G(s)H(s)} \frac{1}{s^2}$$
$$= \lim_{s\to 0} \frac{1}{sG(s)H(s)}$$

فيكون K_v معامل خطأ السرعة velocity error constant كالتالي:

$$K_v = \lim_{s\to 0} sG(s)H(s) \quad (10-\ 3)$$

أما خطأ حالة الاستقرار بدلالة معامل خطأ السرعة فيكون:

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} \quad (11-\ 3)$$

ج -خطأ حالة الاستقرار في حالة دخل دالة العجلة Steady State Error for Acceleration Input

بتطبيق المعادلة (3 -9) مع دخل دالة عجلة قيمتها الوحدة فإن خطأ حالة الاستقرار يكون كالتالي:

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} \frac{s}{1 + G(s)H(s)} \frac{1}{s^3}$$

$$= \frac{1}{\lim s^2 G(s)H(s)}$$

فيكون K_a معامل خطأ العجلة acceleration error constant كالتالي:

$$K_a = \lim_{s \to 0} s^2 G(s)\,H(s) \qquad (12\text{-}\ 3)$$

أما خطأ حالة الاستقرار بدلالة معامل خطأ العجلة فيكون:

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} \qquad (13\text{-}\ 3)$$

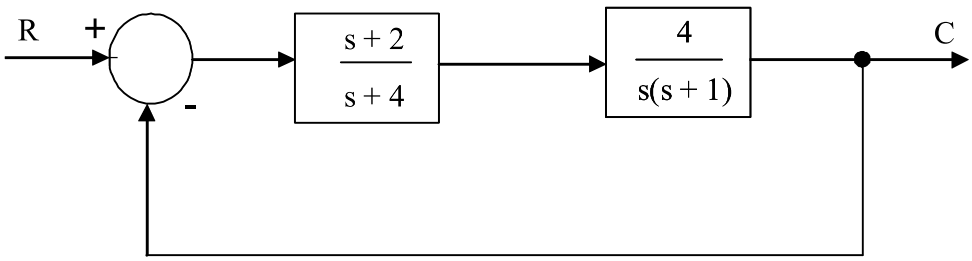
الجدول (3 -1) يلخص خطأ حالة الاستقرار لكل الأنظمة ذات الأنواع (and2,0,1) عندما تغذى من إشارات دخل مختلفة .

	دخل دالة الخطوة r(t) = 1	دخل دالة الانحدار r(t) = t	دخل دالة العجلة $r(t) = t^2$
نظام Type 0	1 / (1 + K)	∞	∞
نظام Type 1	0	1 / K	∞
نظام Type 2	0	0	1 / K

جدول (3 -1) خطأ حالة الاستقرار بدلالة K.

مثال (3 -4):

أوجد معاملات الخطأ المختلفة (الوضع K_p - السرعة K_v العجلة K_a) لنظام التحكم المتزن المبين في الشكل(3 -7). ثم أوجد خطأ حالة الاستقرار e_{ss} في كل من حالة دخل دالة الخطوة ودالة الانحدار ودالة العجلة.



الشكل(3 -7) نظام تحكم متزن.

الحل:

باستخدام المعادلات(3 -10) و(3 -12) ينتج التالي:

Position error constant $$K_p = \lim_{s\to 0} G(s) = \lim_{s\to 0} \frac{4(s+2)}{s(s+1)(s+4)} = \infty$$

Velocity error constant $$K_v = \lim_{s\to 0} sG(s) = \lim_{s\to 0} \frac{4(s+2)}{s(s+1)(s+4)} = 2$$

Acceleration error constant $$K_a = \lim_{s\to 0} s^2 G(s) = \lim_{s\to 0} \frac{S4(s+2)}{s(s+1)(s+4)} = 0$$

أ - خطأ حالة الاستقرار e_{ss} مع دخل دالة الخطوة قيمتها الوحدة من معادلة (3 -9) كالتالي:

$$e_{ss} = 1/(1+K_p)$$
$$e_{ss} = 1/(1+\infty) = 0$$

ب - خطأ حالة الاستقرار e_{ss} مع دخل دالة الانحدار قيمتها الوحدة من معادلة (3 -11) كاتالى:

$$e_{ss} = 1/K_v$$

$$e_{ss} = 1/2.$$

خطأ حالة الاستقرار e_{ss} مع دخل دالة العجلة قيمتها الوحدة من معاملة (3 -13) كالتالي:

$$e_{ss} = 1/K_a$$
$$e_{ss} = 1/0 = \infty$$

مثال(3 -5):

أوجد خطأ حالة الاستقرار e_{ss} في كل حالة من الحالات الآتية :

أ - نظام من Type 0 بدخل دالة الخطوة ومعامل خطأ الوضع $K_p = 1/19$

ب - نظام من Type 1 بدخل دالة الانحدار ومعامل خطأ السرعة $K_v = 0.2$

ج - نظام من Type 2 بدخل دالة العجلة ومعامل خطأ العجلة $K_a = 0.5$

الحل:

أ - خطأ حالة الاستقرار e_{ss} مع دالة الخطوة لنظام Type 0 ومعامل خطأ الوضع $K_p = 1/19$ يكون كالتالي:

$$e_{ss} = 1/(1 + K_p) = 1/[1 + (1/19] = 0.95$$

ب -خطأ حالة الاستقرار e_{ss} مع دالة الانحدار لنظام Type 0 ومعامل خطأ السرعة $K_v = 0.2$ يكون كالتالى:

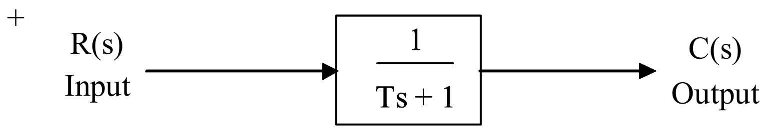
$$e_{ss} = 1/K_v = 1/0.2 = 0.95$$

ج - خطأ حالة الاستقرار e_{ss} مع دالة العجلة لنظام Type 0 ومعامل خطأ العجلة $K_a = 0.5$ ويكون كالتالي:

$$e_{ss} = 1/K_a = 1/0.5 = 2$$

4-2-3. الاستجابة العابرة للأنظمة ذات الرتبة الأولى Transient Response of First Order Systems

لدراسة الاستجابة العابرة لنظام تحكم من الرتبة الأولى كما هو مبين بالشكل (3 - 8) حيث إن درجة S في المقام هي واحد.



الشكل(3 -8) نظام من الرتبة الأولى.

وسوف ندرس استجابة هذا النظام c(t) عندما يكون الدخل دالة الخطوة بقيمة الواحدة unit step function أي أن:

$$r(t) = 0 \qquad t \langle 0$$
$$r(t) = 1 \qquad t \rangle 0$$
$$R(s) = 1/s \qquad (14- \ 3)$$

وكما في المخطط الصندوقي المبين بالشكل (5 -5) والذي يوضح العلاقة بين الدخل والخرج، نجد أن الخرج هو:

$$C(s) = \frac{1}{Ts+1} R(s) \qquad (15- \ 3)$$

وبالتعويض من معادلة (3 -14) في (3 -15) ينتج:

$$C(s) = \frac{1}{s(Ts+1)} \qquad (16- \ 3)$$

حيث إن T يعرف بأنه مقدار ثابت يسمى الثابت الزمني ولإيجاد الاستجابة C(t) نستخدم طريقة الكسور الجزئية partial fraction وتحويل اللابلاسي العكسي inverse laplace كالتالي:

$$\frac{1}{s(Ts+1)} = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{Ts+1}$$

ونحسب قيم الثوابت A_1, A_2 كالتالي:

$$A_1 = \left| s\frac{1}{s(Ts+1)} \right|_{s=0} = \frac{1}{1} = 1$$

$$A_2 = \left| (Ts+1)\frac{1}{s(Ts+1)} \right|_{s=-\frac{1}{T}} = \frac{1}{\frac{1}{T}} = -T$$

و بالتعويض عن هذه الثوابت في المعادلة الأولى نحصل على:

$$C(s) = \frac{1}{s} + \frac{-T}{Ts+1}$$

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s+(\frac{1}{T})}$$

وباستخدام التحويل العكسى للابلاس تكون الاستجابة لأنظمة ذات الرتبة الأولى هي:

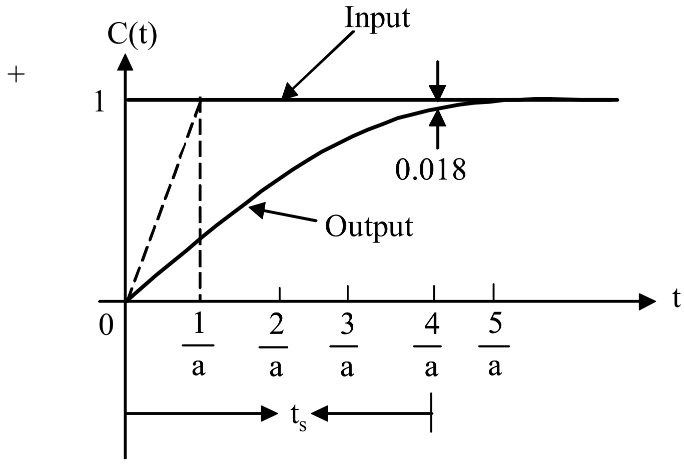
$$C(t) = L^{-1}[C(s)] = L^{-1}[\frac{1}{s}] - L^{-1}[\frac{1}{s+(\frac{1}{T})}]$$

$$C(t) = 1 - e^{\frac{-t}{T}} \qquad t \geq 0$$

وبفرض ان $a = \frac{1}{T}$

$$C(t) = 1 - e^{-at} \qquad t \geq 0 \quad (17-\ 3)$$

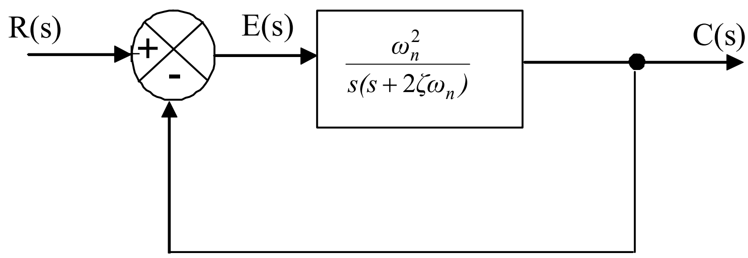
الشكل (5 -6) يوضح الاستجابة العابرة لنظام من الرتبة الأولى مع دخل دالة الخطوة والتى تم رسمها من المعادلة (3 -17).



الشكل(3 -9) استجابة نظام من الرتبة الأولى.

5-2-3. الاستجابة العابرة للأنظمة ذات الرتبة الثانية Transient Response of Second Order Systems

لدراسة الاستجابة العابرة لنظام من الرتبة الثانية كما هو مبين بالشكل(3 -10) حيث إن درجة S في المقام هى 2.



الشكل(3 -10) نظام من الرتبة الثانية.

نجد أن دالة التحويل لهذا النظام تكون:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18-\ 3)$$

حيث إن:

التردد الطبيعي غير المضائل ω_n is the undamped natural frequency

نسبة المضائلة ζ is the damping ratio of the system

وبفرض أن دخل النظام عبارة عن دالة الخطوة وقيمتها الواحد فإن استجابة النظام أي الخرج C(t) تتوقف على قيمة نسبة المضائلة damping ratio فيكون خرج هذا النظام باستخدام المعادلة (3 -7) كالتالي:

$$C(s) = \frac{R(s)\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

وبالتعويض عن $R(s) = \frac{1}{s}$ نجد أن:

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3\ -19)$$

وبإجراء التحويل اللابلاسى العكسي للمعادلة (3 -18) ينتج التالي:

$$C(s) = \frac{1}{s} + \frac{A_1}{s - P_1} + \frac{A_2}{s - P_2}$$

حيث إن:

ثوابت الكسور الجزئية = A_1, A_2 constants of partial fraction

جذور معادلة الدرجة الثانية = P_1, P_2 roots of the second order equation

وعلى ذلك فإن استجابة النظام أي خرجه تكون كالتالي:

$$C(t) = 1 + A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t} \quad (3\ -20)$$

حيث ان:

$$A_1 = -\frac{1}{2} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\zeta - 1}} \qquad P_1 = -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

$$A_2 = -\frac{1}{2} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\zeta - 1}} \qquad P_2 = -\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

مما سبق يتضح أن السلوك الديناميكي للأنظمة ذات الرتبة الثانية يعتمد على المتغيرات (A_1, A_2, P_1, P_2) والتي بدورها تتعلق بكل من (ζ, ω_n) كما في الحالات التالية:

أ - إذا كانت $0 \langle \zeta \langle 1$ under damped system

يكون الجذران (P_1, P_2) مركبين ومترافقان Complex conjugates ويقعا في الجانب الأيسر من المستوى المركب S وتكون الثوابت (A_1, A_2) مركبين في هذه الحالة يسمى النظام المضائل under _ damped system حيث إن :

$$P_1, P_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

وتكون الاستجابة العابرة له من معادلة الخرج هي:

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{\xi^2 - 1}}\sin(\omega_d t + \beta) \quad (21-\ \ 3)$$

حيث إن:

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \qquad (22-\ \ 3)$$

$$\beta = \tan^{-1}(\frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi} \quad (23-\ \ 3)$$

حيث إن:

التردد الطبيعي المضائل بالمقدار $\sqrt{1-\xi^2}$. ω_d = damping natural frequency.

ب - إذا كانت $\xi = 1$ Critically damped System

يكون الجذران (P_1, P_2) حقيقيان وسالبان ومتساويان negative real and equal roots ويقعا في الجانب الأيسر من المستوى المركب S وتكون الثوابت (A_1, A_2) حقيقيان هذه الحالة يسمى نظام المضائلة الحرجة critical damped system حيث إن:

$$P_1, P_2 = -\omega_n$$

وتكون الاستجابة العابرة له من معادلة الخرج هي:

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t}(1 - \omega_o t) \quad (24-\ 3)$$

ج - إذا كانت $\xi \rangle 1$ Over damped System

يكون الجذران (P_1, P_2) حقيقيان وسالبان وغير متساويان ويقعا في الجانب الأيسر من المستوى المركب S وتكون الثوابت (A_1, A_2) حقيقيان وفى هذه الحالة يسمى نظام المضانلة الزاندة Over damped system حيث أن:

$$P_1, P_2 = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

وتكون الاستجابة العابرة له من معادلة الخرج هى:

$$c(t) = 1 - \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}\left(\frac{e^{-a_1 t}}{a_1} + \frac{e^{-a_2 t}}{a_2}\right) (25-\ 3)$$

حيث إن:

$$a_1 = \omega_n(\zeta + \sqrt{1-\zeta^2}) \qquad a_2 = \omega_n(\zeta - \sqrt{1-\zeta^2})$$

د - إذا كانت $\zeta = 0$ Underdamped System

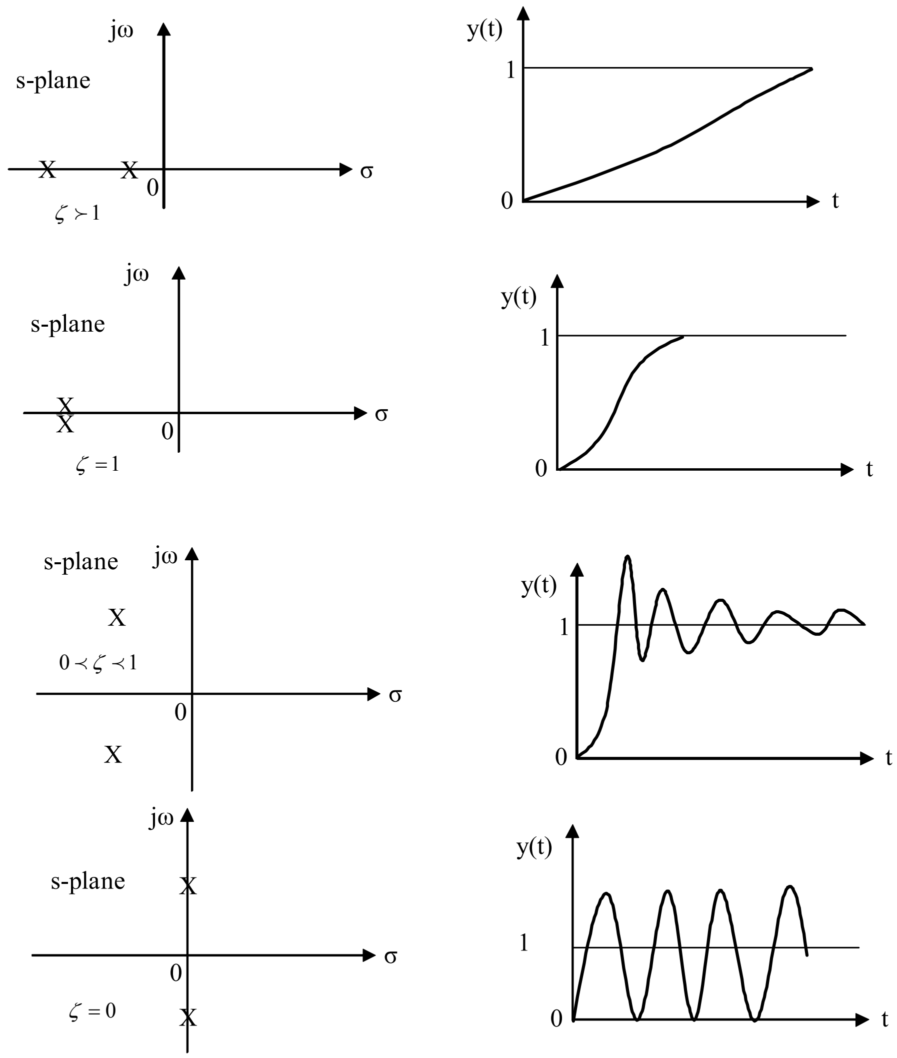
يكون الجذران (P_1, P_2) تخيليان وغير متساويان ويقعان على المحور الرأسي من المستوى المركب S وفى هذه الحالة يسمى نظام غير المضائل وتكون الاستجابة العابرة له متذبذبة باستمرار حيث إن:

$$P_1, P_2 = \pm j\omega_o$$

وتكون الاستجابة العابرة له من معادلة الخرج هي:

$$c(t) = 1 - \cos(\omega_o t) \quad (26-3)$$

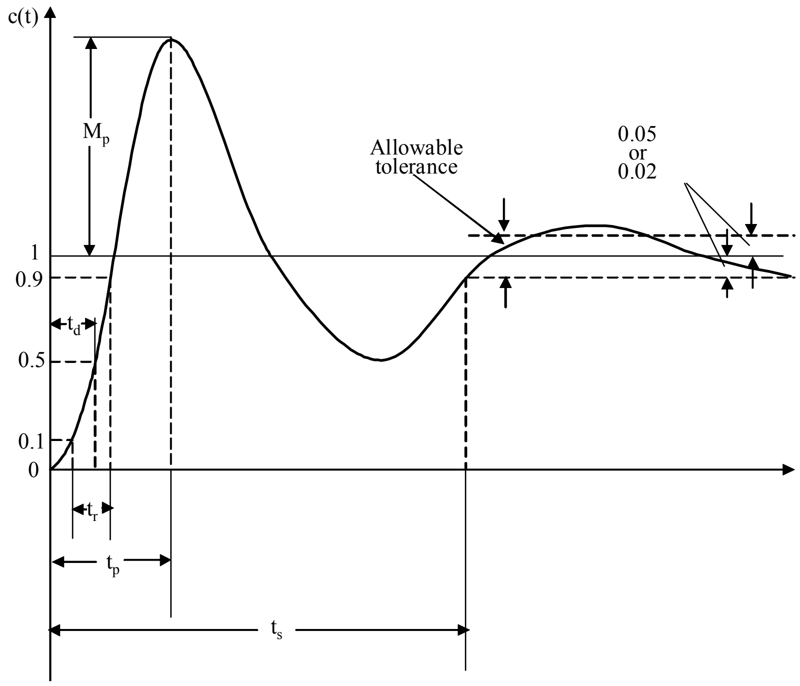
والشكل(3 -11) يوضح تأثير جذور معادلة الخواص (مقام دالة التحويل الكلية) على مضائله استجابة الانظمة ذات الرتبة الثانية عندما يكون الدخل دالة الخطوة وقيمتها الوحدة.



الشكل(3 -11) استجابة نظام من الرتبة الثانية لعدة قيم ζ.

6-2-3. منحنى الخواص لأنظمة التحكم Performance Characteristic of Control system

منحنى الأداء هو منحنى الاستجابة C(t) لنظام من الرتبة الثانية ويظهر فيه مواصفات الاستجابه العابرة عندما يكون الدخل دالة الخطوة وقيمتها الوحدة كما هو مبين بالشكل (3 -12) ومبين عليه المواصفات المختلفة للاستجابة العابرة للنظام مثل (زمن التأخير - زمن الارتفاع - زمن القمة - أقصى تجاوز - زمن السكون).



الشكل(3 -12) منحنى الخواص لأنظمة التحكم.

أ - زمن التأخير (t_d) Delay Time

ويعرف بأنه الزمن المطلوب لكي يصل الخرج إلى نصف قيمته النهائية لأول مرة.

ب - زمن الارتفاع (t_r) Rise Time

ويعرف بأنه الزمن المطلوب لكي يزداد الخرج من 10٪ إلى 90٪ من قيمته النهائية . ويتم التعبير عنه كالتالي:

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (27- \ 3)$$

حيث إن β تقاس من المستوى المركب S بالزوايا النصف قطرية (rad) و ($\pi = 3.14$).

ويمكن حساب كل من β و ω_d كالتالي:

$$\beta = \cos^{-1}\zeta = \tan^{-1}(\frac{\omega_d}{\sigma}) = \tan^{-1}(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) \quad (28- \ 3)$$

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (29- \ 3)$$

وتعرف σ بأنها معامل المضائلة أو ثابت المضائلة ويتم حسابها من العلاقة:

$$\sigma = \zeta\omega_n \quad (30- \ 3)$$

ج - زمن القمة (Peak Time t_p)

ويعرف بأنه الزمن المطلوب لكي يصل الخرج إلى أول قيمة قصوى للتجاوز عن القيمة النهائية ويتم التعبير عنه كالتالي:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (31- \ 3)$$

د – أقصى تجاوز Maximum Overshoot(M_p)

ويعرف بأنه أقصى قيمة يصل إليها خرج النظام (الاستجابة العابرة) متجاوزا بها القيمة النهائية ويتم التعبير عنه كنسبة مئوية كالتالى:

$$M_p = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (32- \ 3)$$

هـ - زمن السكون (t_s Settling Time)

ويعرف بأنه الزمن المطلوب لكي يصل الخرج (الاستجابة) ويبقى في حدود مدى معين عادة يكون (2٪ إلى 5٪) من القيمة النهائية. وهذه القيم تسمى معيار زمن السكون ويتم التعبير عنه في حالتين كالتالي:

$$t_s = 4T = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\zeta\omega_n} \qquad \text{at 2\% criterion} \quad (33-\ 3)$$

$$t_s = 3T = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{\zeta\omega_n} \qquad \text{at 5\% criterion} \quad (34-\ 3)$$

مثال (3 -6):

فى نظام التحكم ذو الرتبة الثانية والمبين في الشكل (5 -7) يحتوي على نسبة مضائلة (اخماد) $\zeta = 0.6$ وتردد طبيعي $\omega_n = 5$ rad/sec أوجد كل من:

أ - زمن الارتفاع (t_r)

ب - زمن القمة (t_p)

ج - زمن السكون (t_s)

د - أقصى تجاوز (M_p)

الحل:

يتم حساب التردد الطبيعى المضائل ومعامل المضائلة وكذلك الزاوية β كالتالي:

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} = 5\sqrt{1-0.6^2} = 4 \text{ rad/sec}$$

$$\sigma = \zeta\omega_n = 0.6\times 5 = 3$$

$$\beta = \tan^{-1}(\frac{\omega_d}{\sigma}) = \tan^{-1}(\frac{4}{3}) = 53.13^{\circ}$$

$$\beta = 53.13^{\circ}\times\frac{3.14}{180} = 0.93 \text{ rad}$$

أ - زمن الارتفاع rise time

$$t_r = \frac{\pi-\beta}{\omega_d} = \frac{3.14 - 0.93}{4} = 0.55 \sec$$

ب - زمن القمة peak time

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{3.14}{4} = 0.785\,\text{sec}$$

ج - زمن السكون settling time

$$t_s = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{3} = 1.33\,\text{sec} \quad \text{for 2\% criterion}$$

$$t_s = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{3} = 1\,\text{sec} \quad \text{for 5\% criterion}$$

د - أقصى تجاوز maximum overshoot

$$M_p = e^{(-\frac{\sigma}{\omega_d})\pi} = e^{-(\frac{3}{4})3.14} = 0.095$$

وتكون النسبة المئوية لأقصى تجاوز هي:

$$M_p = 0.095 \times 100 = 9.5\%$$

تمارين

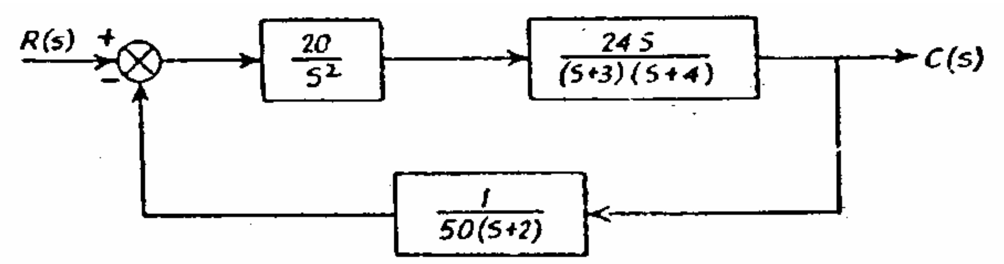
١ - أوجد نوع النظام system type لكل من الأنظمة ذات التغذية الخلفية التي دالة التحويل الخلفية لها تساوي الواحد unity feedback systems ودوال التحويل الأمامية لكل من هذه الأنظمة كالتالي:

$$\text{(a)}\ G(s)=\frac{K}{(1+s)(1+10s)(1+20s)} \qquad \text{(b)}\ G(s)=\frac{10e^{-0.2s}}{(1+s)(1+10s)(1+20s)}$$

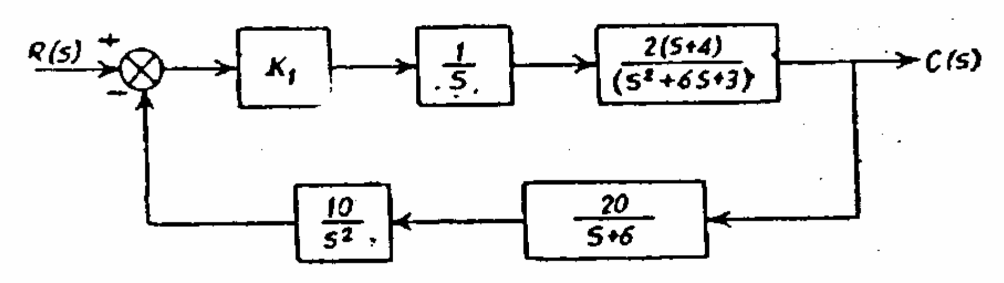
$$\text{(c)}\ G(s)=\frac{10(s+1)}{s(s+5(s+6)} \qquad \text{(d)}\ G(s)=\frac{100(s-1)}{s^2(s+5(s+6)^2}$$

$$\text{(e)}\ G(s)=\frac{10(s+1)}{s^3(s^2+5s+5)} \qquad \text{(f)}\ G(s)=\frac{100}{s^3(s+2)^2}$$

2 - أوجد نوع ورتبة النظام type and order للأنظمة ذات التغذية الخلفية المبينة في المخططات الصندوقية التالية .



(a)



3 - أوجد كل من المعاملات $K_p, K_v \text{and} K_a$ (الوضع - والسرعة - والعجلة) لكل من الأنظمة ذات التغذية الخلفية التي دالة التحويل الخلفية لها تساوي الواحد unity feedback system ودوال التحويل الأمامية لكل من هذه الأنظمة كالتالي:

(a) $G(s)=\dfrac{1000}{(1+0.1s)(1+10s)}$ (b) $G(s)=\dfrac{100}{s(s^2+10s+100)}$

(c) $G(s)=\dfrac{K}{s(1+0.1s)(1+0.5s)}$ (d) $G(s)=\dfrac{100}{s^2(s^2+10s+100)}$

(e) $G(s)=\dfrac{1000}{s(s+10)(s+100)}$ (f) $G(s)=\dfrac{K(1+2s)(1+4s)}{s^2(s^2+s+1)}$

4 - أو جد خطأ حالة الاستقرار e_{ss} للأنظمة ذات التغذية الخلفية التالية .

(a) - $G(s)=\dfrac{1}{s^2+s+2}$ $H(s)=\dfrac{1}{s+1}$

(b) - $G(s)=\dfrac{1}{s(s+5)}$ $H(s)=5$

(c) - $G(s)=\dfrac{1}{s^2(s+10)}$ $H(s)=\dfrac{s+1}{s+5}$

(d) - $G(s)=\dfrac{1}{s^2(s+12)}$ $H(s)=5(s+2)$

في حالة ما يكون الدخل:

أ - وحدة دالة الخطوة unit step input

ب - وحدة دالة الانحدار unit ramp input

5 - احسب كل من $\omega_n, \omega_n, \xi, t_r, t_p, M_p,$ and t_s لنظام تحكم من الرتبة الثانية حيث أن دالة التحويل الكلية لهذا النظام هي:

$$M(s)=\frac{K}{s^2+10s+(7+K)}$$

عندما يكون الكسب الأمامي forward gain K هو:

(أ) K=18

(ب)K=218

(ج) K=618

ووضح تأثير زيادة K على استجابة هذا النظام.

6 - ليكن النظام التالي:

$$y'(t)+10y(t)=10x(t)$$
$$y(0)=0$$
$$x(t)=\begin{cases}5 & t\geq 0\\ 0 & t<0\end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ الثابت الزمني

ب كسب النظام

ج الاستجابة الزمنية

د أرسم منحنى الاستجابة

7 - لدينا نظام من الرتبة الأولى ممثل بالمعادلة الآتية

$$10y'(t)+y(t)=x(t)$$
$$y(0)=0$$
$$x(t)=\begin{cases}10 & t\geq 0\\ 0 & t<0\end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ الثابت الزمني

ب كسب النظام

ج الاستجابة الزمنية

د أرسم منحنى الاستجابة

8 - ليكن النظام التالي

$$y''(t)+3y'(t)+2y(t)=2x(t)$$
$$y(0)=y'(0)=0,$$
$$x(t)=\begin{cases}1 & t\geq 0\\ 0 & t<0\end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ تردد الرنين ومعامل الإخماد ونوع الإخماد

ب كسب النظام

ج الاستجابة لخطوة ارتفاعها 1

د ارسم منحنى الاستجابة

9 - ليكن النظام التالي

$$y''(t) + 2y'(t) + y(t) = 10x(t)$$
$$y(0) = y'(0) = 0,$$
$$x(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ تردد الرنين ومعامل الإخماد ونوع الإخماد

ب كسب النظام

ج الاستجابة لخطوة ارتفاعها 1

د ارسم منحنى الاستجابة

10 - ليكن النظام التالي

$$y''(t) + 4y'(t) + 8(t) = 16x(t)$$
$$y(0) = y'(0) = 0,$$
$$x(t) = \begin{cases} 5 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ تردد الرنين ومعامل الإخماد ونوع الإخماد

ب الاستجابة لخطوة ارتفاعها 1

ج ارسم منحنى الاستجابة

المملكـــة العربيـــة الســـعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تقنية التحكم الآلي

منظومة التحكم ذات الدائرة المغلقة

منظومة التحكم ذات الدائرة المغلقة

4

الوحدة الرابعة : منظومة التحكم ذات الدائرة المغلقة

4 -1. التحكم ذو الدائرة المغلقة

4 -2. تحليل إشارة الخطأ في الحلقة المغلقة

4 -3. تعريف إشارة الخطأ

4 -4. تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي

4 -5. تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التكاملي

4 -6. تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي التكاملي

4 -7. تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي

تمارين

الأهداف

تعريف النظام المغلق

معرفة مزايا النظام المغلق

تعريف إشارة الخطأ في حلقة تحكم مغلقة

تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي

تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التكاملي

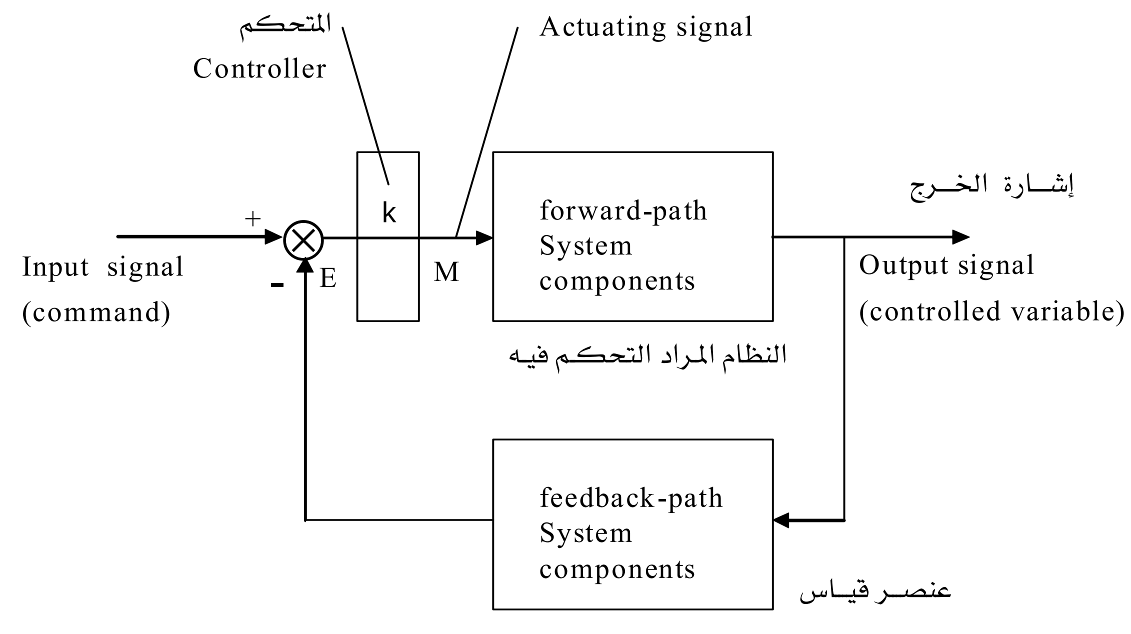
تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي التكاملي

تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التفاضلي

تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي

1-4 التحكم ذو الدائرة المغلقة Closed-loop Control

نظام التحكم ذو الدائرة المقفلة هو نظام تكون فيه إشارة الخرج لها تأثير مباشر على عملية التحكم. بمعنى أن أنظمة التحكم ذات الدائرة المقفلة هي أنظمة تحكم ذات تغذية خلفية.



شكل(4 -1) نظام تحكم ذو دائرة مغلقة.

ويبين شكل(4 -1) الرسم التخطيطي block diagram لتمثيل نظام تحكم ذو دائرة مقفلة، وفيه فإن إشارة الفرق بين الدخل وإشارة التغذية الخلفية E تقوم بتشغيل المتحكم controller K ليؤثر على الوحدة أو النظام المراد التحكم فيه plant للعمل على تقليل الخطأ بين الدخل و الخرج ضبط الخرج عند القيمة المطلوبة. ويجب ملاحظة أن عنصر القياس هنا (أو جهاز القياس) يقوم بقياس الخرج وتحويله إلى إشارة تماثل إشارة الدخل في الوحدات والكميات حتى يمكن مقارنة الدخل والخرج في عنصر المقارنة. ويسمى الدخل هنا عادة الدخل المقارن وذلك لأنه يتم مقارنته مع إشارة التغذية الخلفية التي هي الخرج بعد قياسه وتحويله إلى إشارة ممكن مقارنتها بالدخل. ومن أمثلة عناصر المقارنة هو المكبر الالكتروني operational amplifier وهناك عناصر مقارنة ميكانيكية وأجهزة الهواء المضغوط وخلافه.

ونظرا لأن إشارة التحكم M الخارجة من المتحكم تكون عادة قيمتها صغيرة فإننا نستخدم مكبر قدرة (كهربائي أو ميكانيكي) ليستطيع التأثير على النظام المراد التحكم فيه plant . وهذا المكبر غير مبين في الرسم.

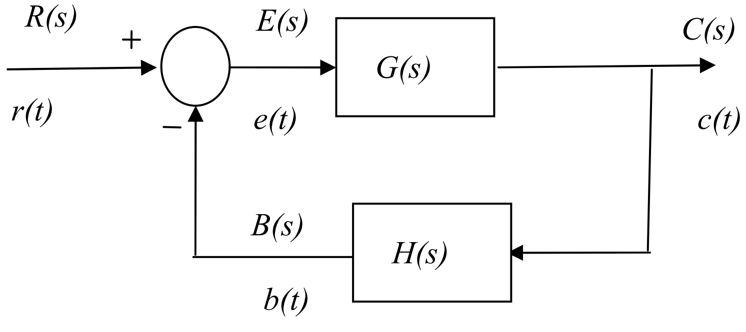
تتميز أنظمة التحكم ذات الدائرة المغلقة باستخدام التغذية الخلفية التي تجعل النظام المتحكم فيه قليل الحساسية للاضطرابات الخارجية والتغيرات الداخلية في معاملات النظام. وعلى ذلك فإنه يمكن استخدام مكونات رخيصة وأقل دقة نسبيا للحصول على نظام تحكم دقيق، وهذا غير ممكن في حالة التحكم ذو الدائرة المفتوحة.

4-2 تحليل إشارة الخطأ في الحلقة المغلقة

درسنا في الوحدة السابقة الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الأولى والثانية، وسنتطرق في هذه الوحدة إلى إشارة الخطأ التي تنشأ في حلقات التحكم المغلقة وسنقوم بتحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي والحاكم التكاملي والحاكم التناسبي التكاملي والحاكم التفاضلي والحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي. وسيتم استخدام برنامج Simulink لعمل محاكاة للحاكمات التي سيتم دراستها لتوضيح تأثير هذه الحاكمات على استجابة الحلقات المغلقة.

4-3 تعريف إشارة الخطأ

يمثل الشكل 3 -1 حلقة تغذية خلفية نموذجية، ومنها تظهر إشارة الخطأ كفرق بين الإشارتين $r(t)$ و $b(t)$ حيث $r(t)$ هي الدخل المرجعي و $b(t)$ قياس للقيمة الواقعية للمتغير



الشكل(4 -2)حلقة تغذية خلفية

المراد التحكم فيه *c(t)*.

$$e(t) = r(t) - b(t)$$

للتبسيط سندرس حالة التغذية الخلفية الأحادية (*H(s)=1*) وعندئذ تكون معادلة إشارة الخطأ في المجال الزمني كما يلي

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1-\ 4)$$

ويمكن كتابتها في مجال المتغير المركب *s* كما يلي

$$E(s)) = R(s) - C(s) \quad (2-\ 4)$$

وعلمنا من الوحدة الأولى أن دالة التحويل للنظام المغلق في حالة التغذية الخلفية الأحادية كما يلي:

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad (3-\ 4)$$

ومنها نستنتج أن:

$$C(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} R(s) \quad (4-\ 4)$$

وبالتعويض عن *C(s)* في المعادلة 3 -2 نحصل على تحويل لابلاس لإشارة الخطأ كما يلي:

$$E(s) = \frac{1}{1+G(s)} R(s) \quad (5-\ 4)$$

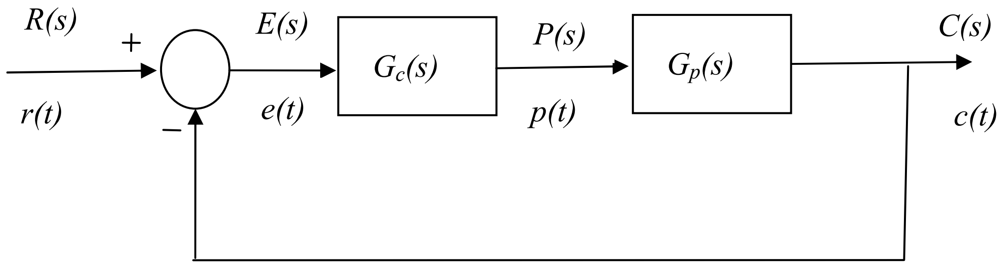
1-1

2-1

يمثل الشكل(4 -3) المخطط الصندوقي لحلقة تحكم ذت تغذية خلفية أحادية مع وجود حاكم في المسار الأمامي، حيث:

$G_p(s)$ دالة تحويل النظام المراد التحكم فيه

$G_c(s$ دالة تحويل الحاكم



الشكل(4 -3) حاكم في حلقة تحكم ذات تغذية خلفية أحادية

لاحظ أن المسار الأمامي يتكون من صندوقين $(G_c(s)$و$(G_p(s))$ موصلين على التعاقب ومن ثم يمكن دمجهما في صندوق واحد دالة تحويله $G(s)=G_c(s)\cdot G_p(s)$

ومن ثم تكون دالة تحويل النظام المغلق كما يلي:

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \quad (6-4)$$

ومن ثم يصبح تحويل لابلاس لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s)=\frac{1}{1+G_c(s)G_p(s)}R(s) \quad (7-4)$$

4-4 تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي

المعادلة الزمنية للحاكم التناسبي على النحو التالي:

$$p(t)=K_p e(t)$$

بإدخال تحويلات لابلاس على طرفي المعادلة الزمنية للحاكم نحصل على

$$P(s)=K_p E(s)$$

ومن ثم تكون دالة تحويل الحاكم التناسبي هي:

$$G_c(s)=K_p \quad (8-4)$$

لشرح تأثير الحاكم التناسبي على استجابة الحلقة المغلقة نستخدم دخلا مرجعيا على هيئة إشارة خطوة ارتفاعها R_0 ونظام يراد التحكم فيه من الرتبة الأولى:

$$r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

ومن ثم يكون تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي

$$R(s) = \frac{R_0}{s}$$

الصيغة العامة لدالة تحويل نظم الرتبة الأولى على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

بالتعويض عن $G_c(s)$ و $G_p(s)$ و $R(s)$ في المعادلة 3 -7 نحصل على تحويل لابلاس لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + K_p \frac{1}{\tau s + 1}} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (9-\ \ 4)$$

بتوحيد المقام في مقام المعادلة 3 -9 نحصل على

$$E(s) = R_0 \frac{\tau s + 1}{s(\tau s + 1 + K_p)} \quad (10-\ \ 4)$$

باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} sE(s) = \lim_{s \to 0} sR_0 \frac{\tau s + 1}{s(\tau s + 1 + K_p)} = \frac{R_0}{1 + K_p} \quad (11-\ \ 4)$$

تفيد المعادلة (4 -11) أن القيمة النهائية لإشارة الخطأ ليست منعدمة، ومن ثم يتضح أن الحاكم التناسبي لا يلغي إشارة الخطأ، غير أنه يمكن التقليل من إشارة الخطأ بزيادة معامل الحاكم التناسبي K_p. لكن الزيادة المفرطة قد تؤدي إلى عدم الاستقرار.

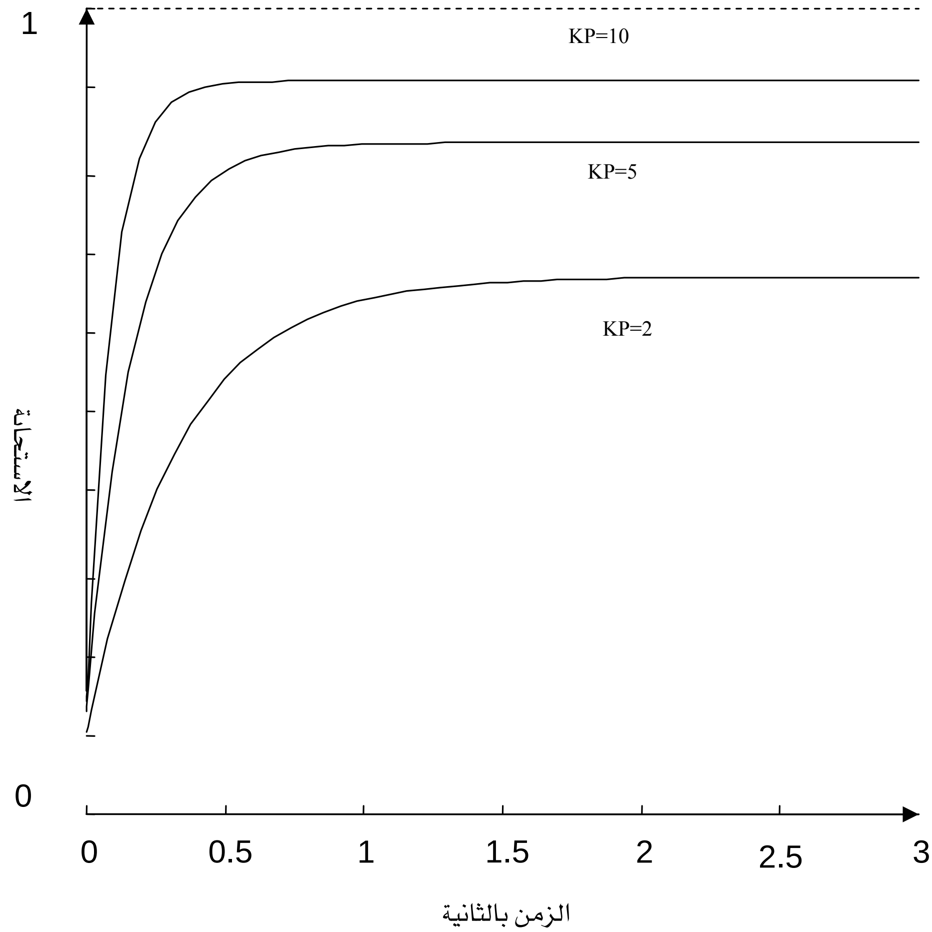
تم عمل محاكاة لحاكم تناسبي في حلقة تغذية خلفية أحادية بواسطة برنامج Simulink

حيث: $G_p(s) = \frac{1}{s+1}$ و الدخل المرجعي $r(t) = 1$

وباختيار معامل الحاكم كما يلي

$$K_p = 2 \qquad K_p = 5 \qquad K_p = 10$$

والشكل 3 -3 يوضح تأثير الحاكم التناسبي على استجابة حلقة مغلقة ذات تغذية خلفية أحادية.



الشكل(4 -4) تأثير الحاكم التناسبي على استجابة نظام تحكم مغلق.

5-4 تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التكاملي

المعادلة الزمنية للحاكم التكاملي عل النحو التالي:

$$p(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$

و دالة تحويل الحاكم التكاملي هي:

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s} \quad (12-\ 4)$$

لشرح تأثير الحاكم التكاملي على استجابة الحلقة المغلقة نستخدم دخلا مرجعيا على هيئة إشارة خطوة ارتفاعها R_0 ونظام يراد التحكم فيه من الرتبة الأولى:

$$r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

ومن ثم يكون تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي

$$R(s) = \frac{R_0}{s}$$

الصيغة العامة لدالة تحويل نظم الرتبة الأولى على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

بالتعويض عن $G_c(s)$ و $G_p(s)$ و $R(s)$ في المعادلة (4 -7) نحصل على تحويل لابلاس لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_I}{s} \bullet \frac{1}{\tau s + 1}} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (13-\ 4)$$

بتوحيد المقام في مقام المعادلة 3 -13 نحصل على

$$E(s) = \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau s^2 + s + K_I)} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (14-\ 4)$$

باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} sE(s) = \lim_{s\to 0} s \bullet \frac{R_0}{s} \bullet \frac{s(\tau s+1)}{(\tau s+1+K_I)} = 0 \quad (15-\ 4)$$

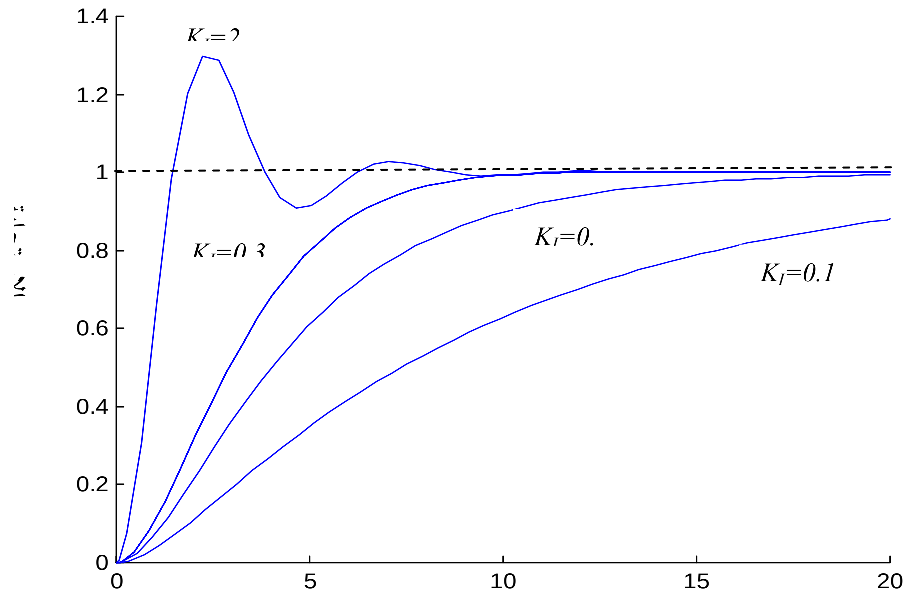
يتضح من المعادلة (4 -15) أن القيمة النهائية لإشارة الخطأ في حالة استخدام الحاكم التكاملي منعدمة، وهذا يعني أن القيمة النهائية للمتغير المراد التحكم فيه تساوي الدخل المرجعي.

تم عمل محاكاة لحاكم تكاملي في حلقة تغذية خلفية أحادية بواسطة برنامج Simulink حيث

دالة تحويل النظام هي $G_p(s) = \frac{1}{s+1}$ و الدخل المرجعي $r(t) = 1$ وباختيار معامل الحاكم كما يلي:

$$K_I = 0.1 \qquad K_I = 0.2 \qquad KI = 0.3 \qquad K_I = 2$$

تم رسم منحنى الاستجابة بنفس البرنامج (Simulink) في الشكل(4 -5) والذي يوضح تأثير الحاكم التكاملي على استجابة نظام تحكم مغلق ذي تغذية خلفية أحادية.



الشكل 3 -4 تأثير الحاكم التكاملي على استجابة نظام تحكم مغلق

الشكل(4 -5) تأثير الحاكم التكاملي على استجابة نظام تحكم

6-4 تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي التكاملي

المعادلة الزمنية للحاكم التناسبي التكاملي عل النحو التالي:

$$p(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$

و دالة تحويل الحاكم التناسبي التكاملي هي:

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (16-\ 4)$$

لشرح تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على استجابة الحلقة المغلقة نستخدم دخلا مرجعيا على هيئة إشارة خطوة ارتفاعها R_0: $r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ ، ومن ثم تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي هو $R(s) = \frac{R_0}{s}$ ، والنظام المراد التحكم فيه من الرتبة الأولى، الصيغة العامة لدالة تحويله على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

وبالتعويض عن $G_c(s)$ و $G_p(s)$ و $R(s)$ في المعادلة 3 -7 نحصل على تحويل لابلاس لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_p s + K_I}{s} \bullet \frac{1}{\tau s + 1}} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (17-\ 4)$$

بتوحيد المقام في مقام المعادلة 3 -16 نحصل على

$$E(s) = \frac{s(\tau s + 1)}{\tau s^2 + s(K_p + 1) + K_I)} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (18-\ 4)$$

باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على

$$e_{ss}=\lim_{s\to 0} sE(s)=\lim_{s\to 0} s\bullet\frac{R_0}{s}\bullet\frac{s(\tau s+1)}{(\tau s^2+s(1+K_p)+K_I)}=0 \quad (19-4)$$

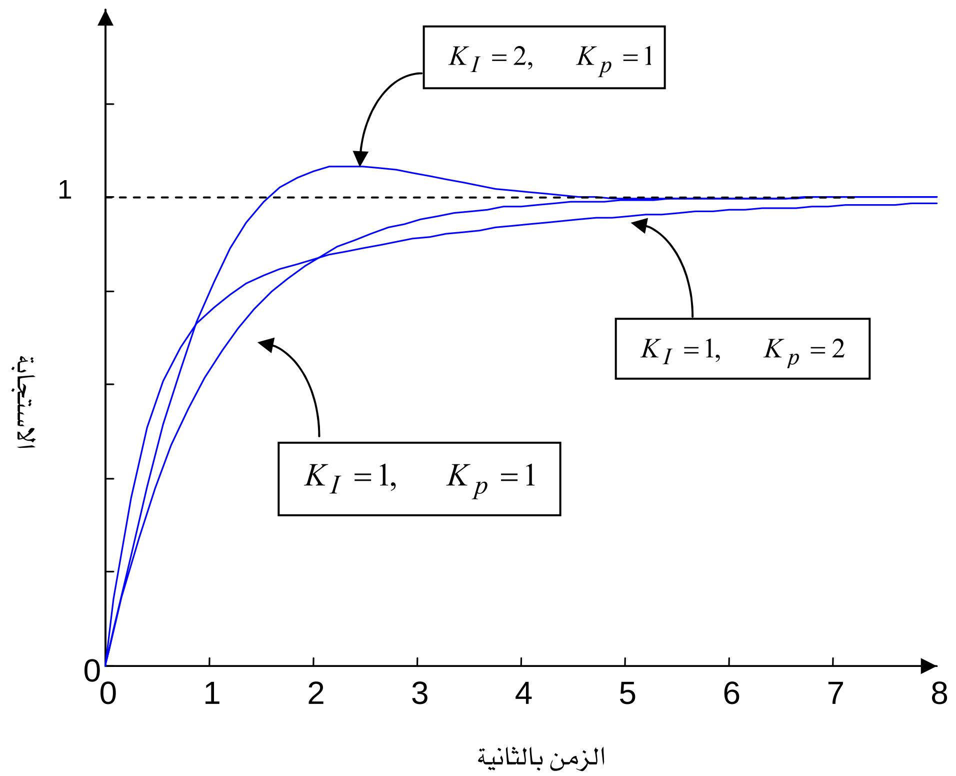
يتضح من المعادلة (4 -19) الحاكم التناسبي التكاملي يلغي إشارة الخطأ ، وهذا يعني أن القيمة النهائية للمتغير المراد التحكم فيه تساوي الدخل المرجعي.

تم عمل محاكاة لحاكم تناسبي تكاملي في حلقة تغذية خلفية أحادية بواسطة برنامج Simulink حيث:

دالة تحويل النظام هي $G_p(s)=\frac{1}{s+1}$ و الدخل المرجعي $r(t)=1$ وباختيار معامل الحاكم كما يلي

$K_I=2,\quad K_p=1$ $\qquad$ $K_I=1,\quad K_p=1$ $\qquad$ $K_I=1,\quad K_p=2$

تم رسم منحنى الاستجابة بنفس البرنامج (Simulink) في الشكل(4 -6) والذي يوضح تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على استجابة نظام تحكم مغلق ذي تغذية خلفية أحادية.



الشكل 3 -5 تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على استجابة نظام تحكم

7-4 تحليل إشارة الخطأ عند استعمال الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي

المعادلة الزمنية للحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي عل النحو التالي:

$$p(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

و دالة تحويلة هي:

$$G_c(s) = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (20- \ 4)$$

لشرح تأثير الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي على استجابة الحلقة المغلقة نستخدم دخلا مرجعيا على هيئة إشارة خطوة ارتفاعها R_0، $r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ ، ومن ثم تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي هو $R(s) = \frac{R_0}{s}$ ، والنظام المراد التحكم فيه من الرتبة الأولى، الصيغة العامة لدالة تحويله على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

وبالتعويض عن $G_c(s)$ و $G_p(s)$ و $R(s)$ في المعادلة 3 -7 نحصل على تحويل لابلاس لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \bullet \frac{1}{\tau s + 1}} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (21- \ 4)$$

بتوحيد المقام في مقام المعادلة 3 -20 نحصل على

$$E(s) = \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau + K_D)s^2 + (K_p + 1)s + K_I)} \bullet \frac{R_0}{s} \quad (4-22)$$

باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} sE(s) = \lim_{s\to 0} s \bullet \frac{R_0}{s} \bullet \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau + K_D)s^2 + (K_p + 1)s + K_I} = 0 \quad (4-23)$$

يتضح من المعادلة (4 -23) أن الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي يلغي إشارة الخطأ، وهذا يعني أن القيمة النهائية للمتغير المراد التحكم فيه تساوي الدخل المرجعي.

يوضح الشكل(4 -7) مخطط محاكاة بواسطة برنامج Simulink لحاكم تناسبي تكاملي تفاضلي في حلقة تغذية خلفية أحادية حيث

دالة تحويل النظام هي $G_p(s) = \frac{1}{s+1}$ و الدخل المرجعي $r(t) = 1$

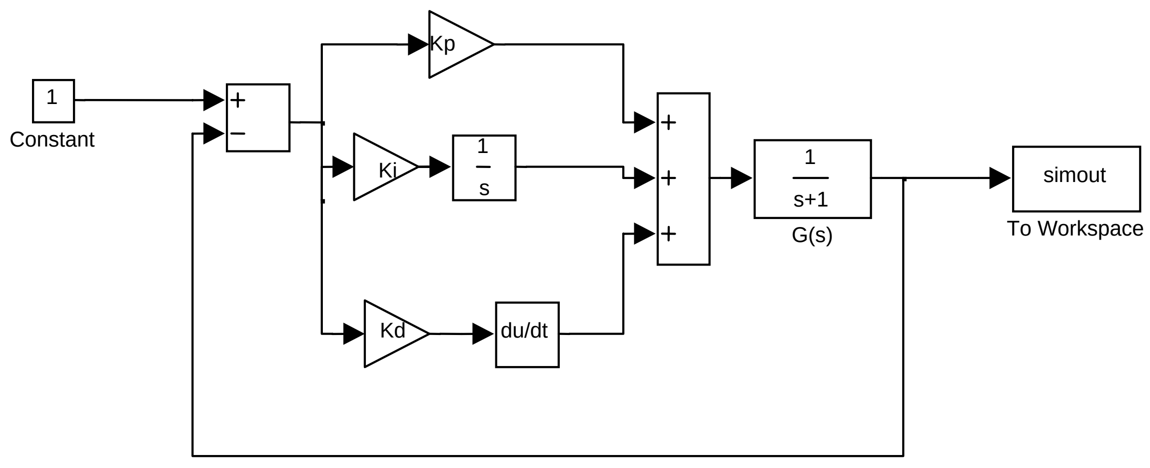
وباختيار معاملات الحاكمات كالآتي:

الحالة الأولى: $K_I = 1, \quad K_p = 1, \quad K_D = 2$

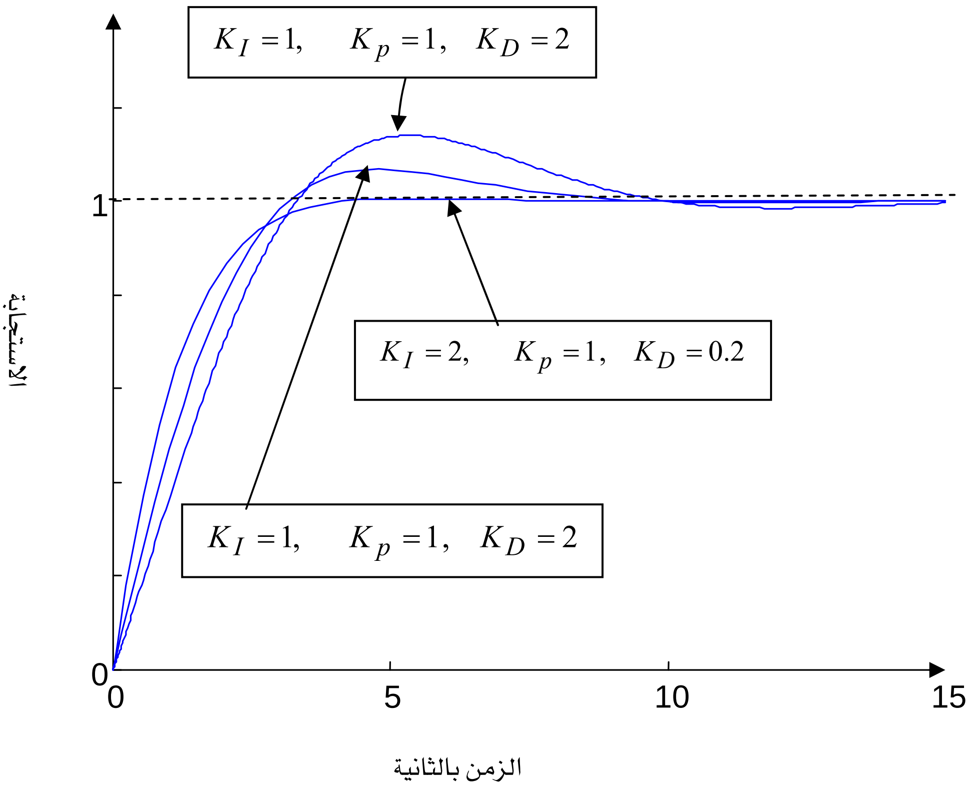
الحالة الثانية: $K_I = 1, \quad K_p = 1, \quad K_D = 1$

الحالة الثالثة: $K_I = 2, \quad K_p = 1, \quad K_D = 0.2$

والشكل(4 -8) يوضح تأثير حاكم تناسبي تكاملي تفاضلي (PID) على استجابة النظام.



الشكل 4 -7 مخطط محاكاة Simulimk لحاكم PID في حلقة مغلقة



الشكل(4 -8) تأثير الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي على استجابة نظام تحكم مغلق

تمارين

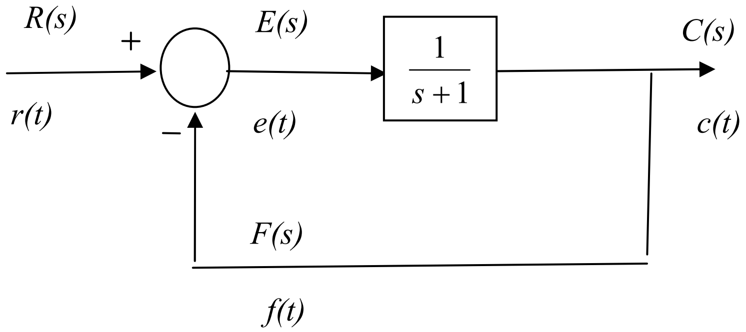
1 - لدينا حلقة تغذية خلفية أحادية كما هو موضح في الشكل أدناه

أوجد ما يلي:

دالة تحويل النظام المغلق

تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

القيمة النهائية لإشارة الخطأ



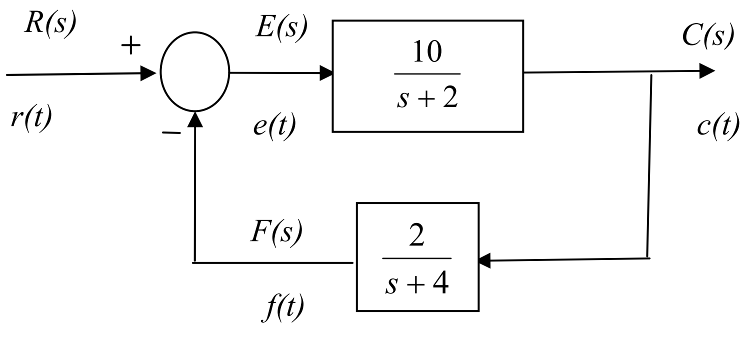
2 - لدينا حلقة تغذية خلفية موضحة بالشكل أدناه

أوجد ما يلي:

دالة تحويل النظام المغلق

تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

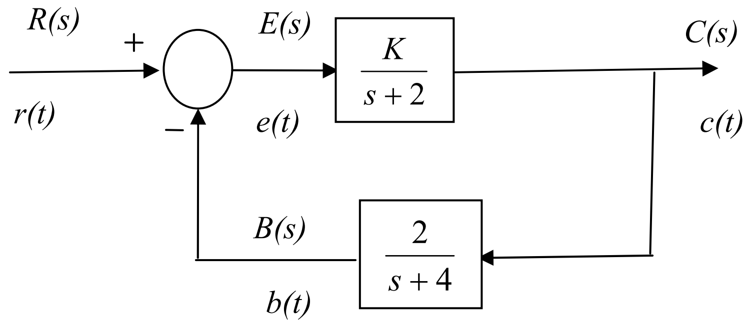
القيمة النهائية لإشارة الخطأ



3 - أثبت أن الحاكم التناسبي في حلقة تغذية خلفية لا يلغي إشارة الخطأ

4 - أثبت أن الحاكم التكاملي في حلقة تغذية خلفية يلغي إشارة الخطأ

5 - أوجد معامل الكسب K المناسب الذي سيلغي إشارة خطأ حالة الاستقرار عند استعمال دخل على هيئة خطوة الوحدة في النظام الموضح أدناه.



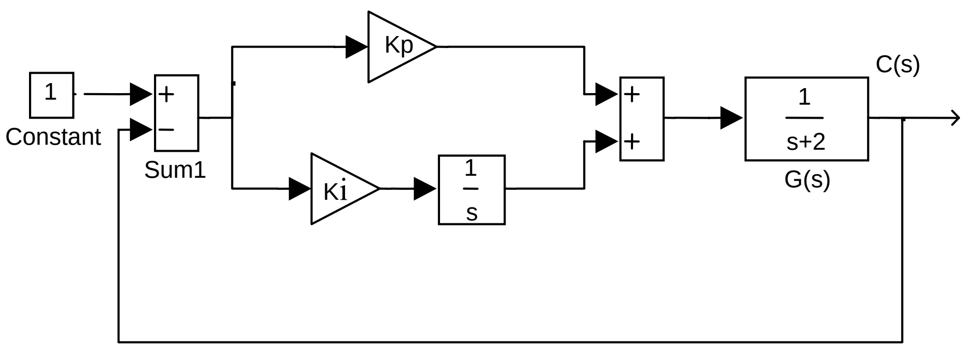
6 - في نظام التحكم الموضح أدناه حدد نوع الحاكم وأوجد الآتي:

دالة تحويل الحاكم

دالة تحويل النظام المغلق

تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

إشارة الخطأ عند حالة الاستقرار e_{ss}



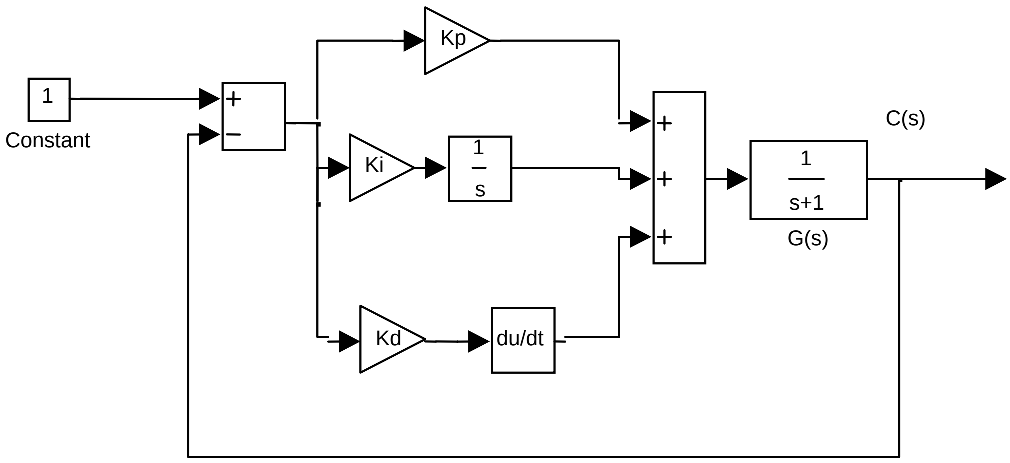
7 - في نظام التحكم الموضح أدناه حدد نوع الحكم وأوجد الآتي:

دالة تحويل الحاكم

دالة تحويل النظام المغلق

تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

إشارة الخطأ عند حالة الاستقرار e_{ss}



مصطلحات

AC Motor	محرك تيار متردد
Actuator	مشغل
Analog	تماثلي
Armature	عضو دوار
Automation	الآلية
Block Diagram	مخطط صندوقي
Bode Diagram	مخطط بودي
Cascade	تعاقب
Characteristic Equation	المعادلة المميزة
Characteristics	خصائص
Chart Recorder	مسجل
Closed Loop	حلقة مغلقة
Compensator	معوض
Control system	نظام تحكم
Control Valve	صمام تحكم
Controlled Variable	المتغير المراد التحكم فيه
Controller	حاكم
Critical Damping	إخماد حرج
Cutoff Frequency	تردد الانكسار
Damping	إخماد
DC Motor	محرك تيار مستمر
Delay Time	زمن التأخير
Derivative	تفاضلي
Derivative Controller	حاكم تفاضلي
Design	تصميم

Digital	رقمي
Disturbance	اضطراب
Dynamic	حركي، ديناميكي
Error	خطأ
Feedback	تغذية خلفية
Feedback Path	مسار خلفي
Final Control Element	عنصر التحكم النهائي
Flow Meter	مقياس معدل تدفق
Flow rate	معدل تدفق
Forward Path	مسار أمامي
Frequency Response	استجابة ترددية
Gain	كسب
Gain Crossover Frequency	تردد عبور الكسب
Gain Margin	هامش الكسب
Hydraulic	هايدرولوكي
Input	دخل
Integral	تكاملي
Integral Controller	حاكم تكاملي
Lag Compensator	معوض تأخير
Laplace Transform	تحويل لابلاس
Lead Compensator	معوض تقديم
Level	مستوى
Magnitude	قيمة
Manual Control	تحكم يدوي
Matrix	مصفوفة
Motor	محرك
Open Loop	حلقة مفتوحة

Oscilloscope	راسم ذبذبات
Output	خرج
Over Damping	إخماد زائد
Overshoot	تجاوز
Parallel	توازي
Peak Time	زمن الذروة
Performance	أداء
Permanent Response	استجابة دائمة
Phase Crossover Frequency	تردد عبور الطور
Phase Margin	هامش الطور
Phase Shift	إزاحة الطور
Pneumatic	هوائي، نوماتي
polynomial	كثير الحدود
Potentiometer	مجزأ الجهد
Process	عملية
Programmable Logic Control	الحاكمات القابلة للبرمجة
Proportional	تناسبي
Proportional Controller	حاكم تناسبي
Reference Input	دخل مرجعي
Resonance Frequency	تردد الرنين
Response	استجابة
Response Curve	منحنى الاستجابة
Rise Time	زمن الصعود
Root	جذر
Sensor	حساس
Series	توالي

Set Point	نقطة الضبط، نقطة التشغيل
Settling Time	زمن الاستقرار
Signal Conditioning	معالج الإشارة
Signal Conversion	محول الإشارة
Simulation	محاكاة
Specification	مواصفات
Stability	استقرار
Stability Criteria	معيار الاستقرار
Step Input	دخل الخطوة
Stepper Motor	محرك الخطوة
Summing Junction	وصلة تجميع
System	نظام
Tachometer	مقياس دوران، تاكوميتر
Take off Point	نقطة تفريع
Time Constant	الثابت الزمني
Time Domain Response	استجابة زمنية
Transducer	محول طاقة
Transfer Function	دالة نقل
Transient response	استجابة عابرة
Two Position Control	حاكم ذو الوضعين
Underdamping	إخماد ناقص
Unit step	خطوة الوحدة
Unity Feedback	تغذية خلفية أحادية

المراجع

1. Modern Control System, R. C. Dorf, Edison Wesley, 1990
2. Control System Design, C. T. Chen, Saunders College Publishing, 1993.
3. Feedback Control System, John Van De Vegta, Prentice Hall, 1990.
4. Automatic Control Systems, B. Kuo, Prentice Hall.
5. Johnson, C. D. *Process Control Instrumentation Technology,* Prentice Hall, 2002
6. Bateson, R. N. *Introduction to Control Systems Technology,* Prentice Hall, 2002
7. Ogata, K. *Modern control Engineering,* Prentice Hall, 1997
8. Dorf, R. C. and Bishop, R. H. *Modern Control Systems,* Addisson Wesley, 1998
9. أحمد فؤاد محمد عامر، هندسة التحكم الآلي، مطبوعات الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري، 1991

المحتويات

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS